Н.Н. ГОРЮНОВ, А.Ф. КУЗНЕЦОВ, А.А. ЭКСЛЕР

СХЕМЫ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 586

Н. Н. ГОРЮНОВ, А. Ф. КУЗНЕЦОВ,
А. А. ЭКСЛЕР

СХЕМЫ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

СОДЕРЖАНИЕ

УДК 621.382.233.014.2
Г 67

Изложены основные принципы конструирования схем на туннельных диодах. Рассмотрены основные параметры и характеристики туннельных диодов. Приведены практические схемы на туннельных диодах.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей и может быть полезна техникам и инженерам, занимающимся конструированием схем на полупроводниковых приборах.

Горюнов Николай Николаевич, Кузнецов Анатолий Филиппович, Экслер Алексей Андреевич.

Схемы на туннельных диодах,

М.-Л., издательство „Энергия", 1965, 80 стр. с илл.
(Массовая радиобиблиотека. Вып. 586).

Сводный тематический план „Радиоэлектроника и связь", 1965 г., № 181.

* * *

Редактор *А. Ю. Клейман* Техн. редактор *Н. С. Мазурова*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 15/VII 1965 г. Подписано к печати 5/X 1965 г.
Т-13707 Бумага 84×108$^{1}/_{32}$ Печ. л. 4,2 Уч.-изд л. 3,85
Тираж 60 000 экз. Цена 15 коп. Заказ 48с

Московская типография № 10 Главполиграфпрома Государственного комитета Совета Министров СССР по печати. Шлюзовая наб., 10.

ГЛАВА ПЕРВАЯ
ТУННЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ

Устройство и принцип действия

Туннельный диод по устройству аналогичен обычному полупроводниковому диоду. Рабочим элементом диода служит полупроводниковый *p-n* переход (*p-n* структура). Структура *p-n* (рис. 1) состоит из двух областей полупроводника: *p*-области с дырочной проводимостью и *n*-области с электронной проводимостью.

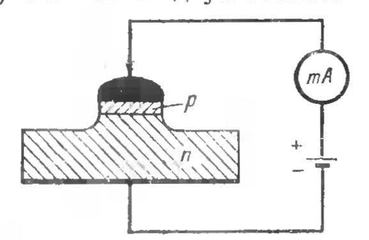


Рис. 1. Схема устройства туннельного диода.

В зависимости от полярности приложенного напряжения через *p-n* переход обычного диода может протекать или малый обратный ток (когда подается запирающее напряжение), или большой прямой ток (когда напряжение приложено в прямом направлении). Прямое направление соответствует положительному смещению области *p* относительно области *n*.

На рис. 2 приведены для сравнения вольт-амперные характеристики обычного диода и туннельного. В отличие от обычного диода ток туннельного диода уже при небольших напряжениях в прямом и обратном направлении (доли вольта) сильно увеличивается. Такое увеличение тока связано с наличием так называемого туннельного механизма перехода носителей заряда (электронов) из одной области *p-n* перехода туннельного диода в другую.

В *p-n* переходе обычного диода электроны, участвующие в создании тока, должны затрачивать определенную энергию для прохождения потенциального барьера

между *p*- и *n*-областями. Эта энергия получается за счет энергии теплового движения электронов.

При туннельном механизме электрон не затрачивает энергии на преодоление потенциального барьера. Он как бы «проходит» под ним (как поезд под горой сквозь туннель). Поэтому при малом напряжении через диод протекает большой туннельный ток. При таком напряжении через обычный диод ток почти не протекает.

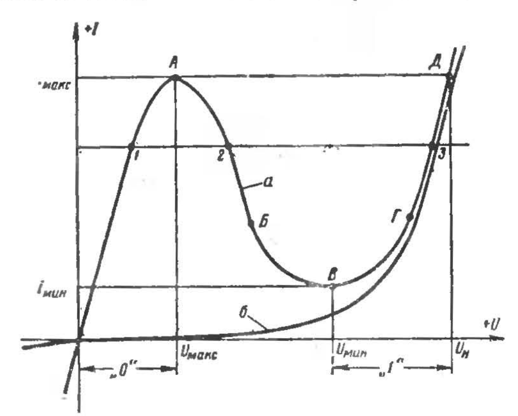


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики диодов

а — туннельного; *б* — обычного.

Туннельный механизм перехода электронов оказывается возможным лишь тогда, когда *p*- и *n*-области полупроводника имеют очень малые удельные сопротивления. Поэтому для изготовления туннельных диодов используют полупроводниковые материалы с большой электропроводностью.

Туннельный ток при включении диода в прямом направлении достигает максимального значения $I_{макс}$ при напряжении $U_{(макс)}$ и при дальнейшем увеличении прямого напряжения резко убывает. Это связано с тем, что при увеличении прямого напряжения уменьшается число электронов, способных совершать туннельный переход. При напряжении $U_{(мин)}$ число этих электронов становится очень малым и туннельный ток почти исчезает. Остается лишь ток электронов, проходящих через *p-n* переход вследствие механизма, существующего в обычных диодах.

При дальнейшем увеличении прямого напряжения вольт-амперные характеристики туннельного и обычного диодов почти одинаковы.

При включении в обратном направлении ток обычного диода очень мал. Наоборот, у туннельного диода обратный ток достигает большой величины при малом напряжении вследствие увеличения числа электронов, способных совершать туннельный переход (этот переход совершается теперь электроном преимущественно в обратном направлении).

Важное преимущество туннельного диода перед обычными полупроводниковыми диодами заключается в его очень высокой рабочей частоте. Это объясняется тем, что туннельный переход электронов происходит практически мгновенно, за время порядка 10^{-13} *сек*.

Частотный предел применения туннельных диодов ограничивается лишь тем, что у них, как и у всяких диодов, *p-n* переход обладает емкостью, сопротивлением потерь (обусловленным объемным сопротивлением полупроводника и выводов) и паразитной индуктивностью выводов.

Вследствие того что при туннельном переходе электрон не затрачивает тепловой энергии, туннельный диод может работать при очень низкой температуре, при которой обычные полупроводниковые диоды и транзисторы перестают работать. Туннельный диод может работать также и при более высокой температуре, чем обычные полупроводниковые приборы.

Свойства и параметры полупроводниковых материалов с малым удельным сопротивлением, идущих на изготовление туннельных диодов, оказываются мало чувствительными к различным условиям внешней среды, например большой влажности. Туннельный диод оказывается очень стойким по отношению и к ядерной радиации.

Основными полупроводниковыми материалами для изготовления современных туннельных диодов служат германий и арсенид галлия.

Условные обозначения серийно выпускаемых отечественных туннельных диодов состоят из четырех элементов.

Первый элемент — буква или цифра — обозначает исходный материал:

Г или 1 — германий;

К или 2 — кремний;
А или 3 — арсенид галлия.

Второй элемент — буква И.

Третий элемент — число, указывающее назначение диодов:

усилительные — от 101 до 199;
генераторные — от 201 до 299;
переключающие — от 301 до 399.

Четвертый элемент — буква, указывающая разновидность типа из данной группы приборов. Для туннельных диодов четвертый элемент обозначения обычно указывает на максимальный ток, по которому производится классификация приборов на типы.

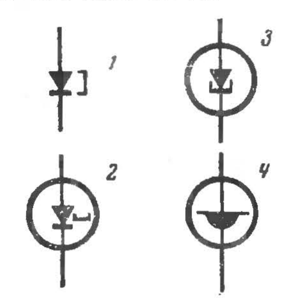


Рис. 3. Варианты условного графического обозначения туннельных диодов.
1, 2 — по ГОСТ; *3, 4* — в зарубежной литературе.

В технической документации и литературе для туннельного диода применяют варианты графического обозначения, приведенные на рис. 3.

Электрические параметры туннельного диода.

Вольт-амперная характеристика и статические параметры. Статические параметры туннельного диода полностью и однозначно определяются по его вольт-амперной характеристике.

Типовая вольт-амперная характеристика (*а*) туннельного диода изображена на рис. 2. Линия (*б*) на этом рисунке обозначает характеристику обычного диода. Особенность вольт-амперной характеристики туннельного диода заключается в наличии на ней падающего участка (*АБВ*, рис. 2) — участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Второе важное свойство характеристики—ее резко нелинейный характер.

Действительно, если провести на рис. 2 прямую, параллельную оси напряжений (линию равных токов) и лежащую ниже точки *А*, но выше точки *В*, то она пересечет характеристику при трех различных значениях напряжений на туннельном диоде. Как будет показано ниже, точки пересечения *1* и *3* устойчивые, а точка *2* неустойчивая. Это свойство туннельного диода весьма важно при построении различных импульсных устройств.

Электрические свойства туннельных диодов, проверяемые на постоянном токе, характеризуются следующими основными параметрами:

$I_{макс}$ — ток максимума, соответствующий максимуму (пику) вольт-амперной характеристики;

$I_{мин}$ — ток минимума, соответствующий минимуму («седлу») вольт-амперной характеристики;

$U_{(макс)}$ — напряжение максимума (напряжение при токе максимума);

$U_{(мин)}$ — напряжение минимума (напряжение при токе минимума);

$U_{п}$ — наибольшее напряжение при протекании тока, равного $I_{макс}$ на диффузионной ветви характеристики (при $U>U_{(мин)}$);

$\Delta U=U_{п}-U_{(макс)}$ — максимальный перепад напряжений, снимаемый с диода в режиме переключения;

$r_{д}=\Delta u/\Delta i$ — дифференциальное отрицательное сопротивление диода (сопротивление переменному току на падающем участке его вольт-амперной характеристики) [1].

Наиболее интересный и важный участок вольт-амперной характеристики туннельного диода — участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Как видно из рис. 2, он резко нелинеен. Область относительно линейного отрицательного сопротивления находится между точками *2* и *Б*. Ток реального туннельного диода на участке *БГ* больше суммы токов основ-

[1] Поскольку величина дифференциального отрицательного сопротивления сильно зависит от напряжения на диоде (выбранной рабочей точки), в паспорте туннельного диода обычно указывается минимальное значение отрицательного дифференциального сопротивления $r_{д.мин}=|-r_{д}|_{мин}$ или интегральное отрицательное сопротивление:

$$-R_{д}=\frac{U_{(макс)}-U_{(мин)}}{I_{макс}-I_{мин}}.$$

ных и неосновных носителей, вычисленных теоретически. Этот ток, получивший название «избыточного», пока еще полностью не объяснен и во многом зависит от технологии изготовления приборов. Величина избыточного тока определяет качество туннельного диода, поскольку от него зависит к. п. д. и шум-фактор ($F_ш$) диода. Поэтому часто туннельные диоды характеризуют отношением $I_{макс}/I_{мин}$. Чем больше это отношение, тем лучше диод.

Температурные характеристики. Значительным преимуществом туннельных диодов перед транзисторами и

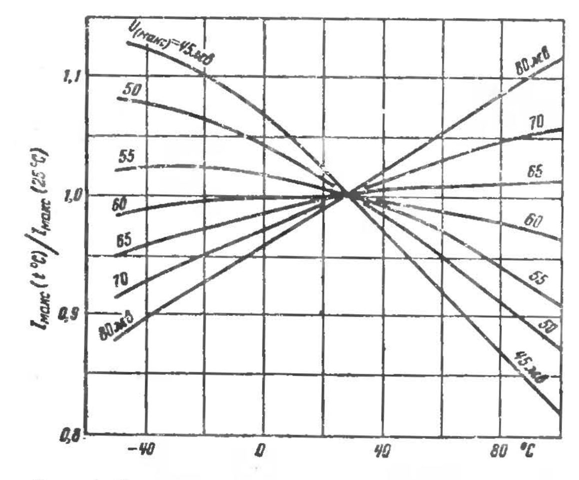


Рис. 4. Зависимость тока максимума туннельного диода от температуры для разных значений $U_{(макс)}$.

обычными диодами является лучшая температурная стабильность статических параметров и значительно более широкий рабочий диапазон температур. Если для лучших образцов германиевых транзисторов максимальная положительная температура перехода равна 100° С, то для туннельных диодов из германия она равна 200° С, а из арсенида галлия — +400° С. При отрицательных температурах туннельные диоды могут работать до —269° С. Весьма важно то, что основные параметры туннельных диодов очень слабо меняются с температурой. В прило-

жении приведены вольт-амперные характеристики серийного отечественного туннельного диода 3И301 для трех температур окружающей среды, а в таблице на стр. 11 показано изменение основных параметров по постоянному току при изменении температуры от —50 до +100° С зарубежных туннельных диодов IN2939 и IN2940 (фирма «General Electric», США). Из графиков и таблицы видно, что с увеличением температуры, напряжения $U_{(макс)}$, $U_{(мин)}$ и $U_н$ уменьшаются, в то время как ток $I_{мин}$ увеличивается; пиковый ток может как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от содержания примеси и удельного сопротивления полупроводникового материала, что показано на рис. 4 для диодов из n-германия с разными $U_{(макс)}$ (т. е. с разной концентрацией примеси). Видно, что соответствующим выбором материала и технологии можно довести температурные коэффициенты большинства статических параметров до десятых и даже сотых долей процентов на 1° С. Для диодов из арсенида галлия они могут быть уменьшены еще примерно на порядок.

Эквивалентная схема туннельного диода и ее параметры

Если для анализа статических параметров туннельного диода достаточно вольт-амперной характеристики, то для определения параметров, характеризующих частотные свойства туннельного диода, удобнее всего воспользоваться его эквивалентной схемой. Учитывая выводы теории, относящиеся к туннельному эффекту и p-n переходу, и допуски при практическом изготовлении диодов, эквивалентную схему туннельного диода можно представить так, как показано на рис. 5. Эта схема, вообще говоря, справедлива для любого участка его вольт-амперной характеристики, однако использовать ее для практических расчетов целесообразно лишь на падающем участке вольт-амперной характеристики и для малых сигналов (когда можно пренебречь зависимостью параметров схемы от внешнего сигнала, т. е. считать туннельный диод линейным активным двухполюсником).

Здесь через $r_д(u)$ и $c_д(u)$ обозначены соответственно дифференциальное сопротивление и емкость p-n перехода туннельного диода при заданном напряжении сме-

щения; $L_д$ — суммарная индуктивность диода, в которую входят индуктивности патрона и выводов; $R_п$ — суммарное сопротивление потерь в полупроводниковом материале, контактах и выводах диода; $C_п$ — паразитная емкость патрона и выводов прибора.

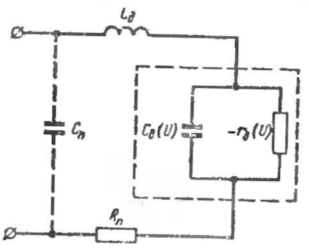


Рис. 5. Эквивалентная схема туннельного диода.

Необходимо отметить, что параметры диода $r_д$ и $C_д$, указываемые в его паспорте, и соответствующие параметры эквивалентной схемы на рис. 5 не одно и то же. Дело в том, что сопротивление и емкость собственно *p-n* перехода практически не поддаются измерению. Измеряют обычно суммарные величины $r_д = r_{перехода} + R_п$ и $C_д = C_{перехода} + C_п$. Полная емкость диода $C_д$ определяется в основном емкостью перехода. Влияние $C_п$ заметно лишь для высокоскоростных туннельных диодов, используемых в СВЧ диапазоне.

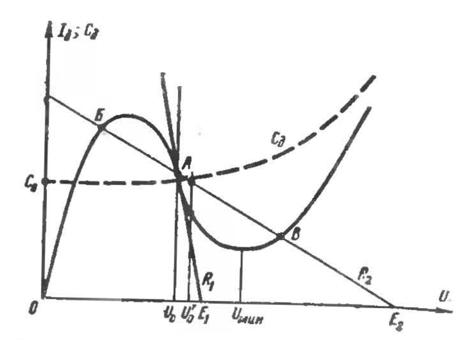


Рис. 6. Зависимость емкости туннельного диода от напряжения.

В дальнейшем, если это не будет оговорено особо, будем считать, что величиной $C_п$ можно пренебречь (поэтому на рис. 5 она показана штриховой линией), и полную емкость $C_д$ отождествлять с емкостью *p-n* перехода. Параметр эквивалентной схемы $r_д(u)$ может быть вычислен, если известны паспортные (или измеренные) зна-

Таблица

Типичные значения параметров туннельного диода 1N2939

Параметр	Обозначение в зарубежной литературе	Численное значение		
		минимальное	номинальное	максимальное
Максимальный (пиковый) ток $I_{макс}$, *ма*	I_p	0,9	1	1,1
Напряжение максимума (пика) $U_{(макс)}$, *мв*	U_p	—	60	65
Температурный коэффициент $\Delta U_{(макс)}/\Delta T$, *мкв*/°C	$\Delta U_p/\Delta T$	—	—60	—
Ток минимума (седла) $I_{мин}$, *ма*	I_V	—	0,1	0,14
Температурный коэффициент $\Delta I_{(мин)}/\Delta T$, *ма*/°C	$\Delta I_V/\Delta T$	—	+0,75%/°C	—
Напряжение минимум (седла) $U_{(мин)}$, *мв*	U_V	—	350	—
Температурный коэффициент $\Delta U_{(мин)}/\Delta T$, *мв*/°C	$\Delta U_V/\Delta T$	—	—1,0	—
Наибольшее напряжение $U_н$, *мв*	U_{fp}	450	500	600
Температурный коэффициент $\Delta U_н/\Delta T$, *мв*/°C	$\Delta U_{fp}/\Delta T$	—	—1,0	—
Отношение пикового тока к току минимума (седла) $H = \frac{I_{макс}}{I_{мин}}$	$H = \frac{I_p}{I_V}$	8	10	—
Дифференциальное отрицательное сопротивление $-r_д$, *ом*	$-r_d$	100	150	200
Температурный коэффициент $\Delta r_д/\Delta T$, *ом*/°C	$\Delta r_d/\Delta T$	—	—0,5%/°C	—
Общая емкость $C_д$, *пф*	C_d	—	7	15
Отношение емкости к току максимума $C_д/I_{макс}$, *пф/ма*	C_d/I_p	—	6	—
Последовательная индуктивность $L_д$, *нгн*	L_s	1	6	12
Сопротивление потерь $R_п$, *ом*	R_s	—	1,5	4

чения дифференциального отрицательного сопротивления диода $|-r_д| = \Delta U/\Delta i$ и сопротивление потерь $R_п$.

Вследствие квантово-механической природы механизм проводимости туннельного диода можно считать безынерционным вплоть до частот 10^{13} *гц*, т. е. величина $-r_д$ практически не зависит от частоты. Поэтому основные частотные ограничения туннельного диода связаны с паразитными элементами эквивалентной схемы $C_д$, $L_д$ и $R_п$. Типовые значения этих величин для туннельного диода 1N2939 даны в таблице, параметры некоторых типов отечественных приборов приведены в конце книги.

Индуктивность $L_д$ зависит главным образом от конфигурации выводов. Для лучших современных диодов ее величина значительно меньше 10^{-9} *нгн* (наногенри). Как видно из кривых на рис. 6, емкость перехода туннельного диода представляет собой функцию напряжения на нем:

$$C_д \approx \frac{C_0}{\left(1 - \frac{U}{\Phi}\right)^{1/2}}, \quad (1)$$

где Φ — контактный потенциал;

C_0 — емкость перехода при $U=0$.

Однако на участке $U=0$ до $U=U_{(мин)}$ изменение $C_д$ незначительно и с достаточной для практики точностью можно считать:

$$C_д = C_0 |_{u_д = U_{(мин)}}. \quad (2)$$

Это значение и указывается обычно в паспорте прибора. Точка $U_{(мин)}$ выбрана главным образом из соображений удобства и точности сортировки диодов в условиях массового производства.

Так как отрицательное сопротивление $-r_д$ шунтируется емкостью диода $C_д$, при повышении частоты активная составляющая полного сопротивления диода уменьшается по абсолютной величине.

Частота $f_г$ (предельная частота туннельного диода), до которой активная составляющая полного сопротивления имеет отрицательный знак (что дает возможность усиливать и генерировать колебания), равна:

$$f_г = \frac{1}{2\pi |-r_д| C_д} \sqrt{\frac{|-r_д|}{R_п} - 1}. \quad (3)$$

Эта формула получается, если приравнять нулю действительную часть комплексного сопротивления диода, получаемого путем несложных преобразований эквивалентной схемы на рис. 5, в виде

$$\dot{Z}_{вх} = \left(R_п + \frac{G_д}{G_д^2 + \omega^2 C_д^2}\right) + j\left(\omega L_д - \frac{\omega C_д}{G_д^2 + \omega^2 C_д^2}\right), \quad (4)$$

где $G_д = 1/r_д$ — отрицательная проводимость туннельного диода.

Из этого же выражения может быть получена еще одна характеристическая частота туннельного диода — собственная резонансная частота f_0, определяемая как частота, при которой мнимая часть $z_{вх}$ равна нулю:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_д C_д} - \frac{1}{(r_д C_д)^2}}. \quad (5)$$

Естественно, что все приведенные математические выкладки, как и сама эквивалентная схема на рис. 5, справедливы и удобны лишь при анализе схем, работающих на малых уровнях сигнала.

Быстродействие переключающих схем с туннельными диодами (триггеров, одновибраторов и т. п.) характеризуется величиной $\tau_{пер}$ — временем переключения из состояния с напряжением на диоде, меньшим $U_{макс}$, в состояние с напряжением, бóльшим $U_{мин}$. Величина $\tau_{пер}$ зависит как от свойств самого диода, так и от параметров схемы. Время переключения оказывается тем меньше, чем меньше величина отношений $C_д/I_{макс}$. Вследствие этого для быстродействующих переключающих схем обычно выбирают диоды с большими токами максимума и малыми емкостями.

Вообще говоря, туннельный диод, как и транзистор,— «универсальный» прибор, однако при выборе системы параметров, характеризующих тот или иной тип туннельного диода, обычно учитывают, в каких схемах он будет применен.

Например, для переключающих схем наиболее важны начальный разброс и стабильность (температурная и временнáя) тока максимума, который определяет порог переключения; необходимо также знать величины $I_{мин}$, $U_н$ и $C_д$. В то же время для этого класса схем параметры — $r_д$, $R_п$, $L_д$ второстепенные.

В схемах генераторов и усилителей, наоборот, параметр $U_п$, как правило, лишний, а величины $U_{мин}$ и $I_{мин}$ имеют второстепенное значение, в то время как знание параметров $C_д$, $L_д$, $-r_д$ и $R_п$ необходимо.

Предельные величины

Предельные величины тока, температуры и окружающей среды для туннельных диодов зависят главным образом от максимальной температуры перехода, размера площади перехода и эффективности теплоотвода.

Выпускаемые в настоящее время туннельные диоды могут работать в весьма широком диапазоне токов (от 10—100 *мка* до десятков и сотен ампер в зависимости от типа диода).

Однако если для «слаботочных» германиевых диодов ($0{,}1$ *ма* $< I_{макс} < 10$ *ма*) вполне допустимы двух-трехкратные превышения величины $I_{макс}$, то диоды с $I_{макс}$ порядка нескольких ампер часто разрушаются при токе на диффузионной ветви вольт-амперной характеристики, равном и даже меньшем, чем $I_{макс}$ (для туннельных диодов $I_{макс}$ не является предельной величиной тока).

Так как через переход туннельного диода может проходить большой ток даже при низких прямых и обратных напряжениях, весьма важную величину, особенно для диодов из арсенида галлия, представляет собой плотность тока через переход, зависящая от величины отношения тока через диод к емкости *p-n* перехода ($I_д/C_д$). Превышение некоторого критического значения этой величины при положении рабочей точки на диффузионной ветви вольт-амперной характеристики у диодов из арсенида галлия ведет к «деградации» — необратимому изменению в худшую сторону основных статических параметров. При этом величина $I_{д.крит}$ может быть в несколько раз меньше величины $I_{макс}$ данного диода.

Следует отметить, что до настоящего времени деградация наблюдалась только у арсенид-галлиевых диодов и притом только при работе на диффузионной ветви и полностью это явление пока не объяснено.

В технических условиях на туннельный диод в разделе «Предельные величины» приводятся также предельные механические перегрузки, давление и влажность окружающей среды и диапазоны рабочей температуры

перехода и температуры хранения приборов. Как указывалось выше, теоретически туннельный диод может работать от температуры жидкого гелия (—269° С) до точки плавления сплавов, однако практически термоустойчивость конструкции корпуса и схемные ограничения допустимого изменения параметров значительно сужают этот диапазон, и большинство серийных туннельных диодов работает устойчиво при температуре от —60 до +150° С.

Тем не менее туннельный диод самый термоустойчивый из всех полупроводниковых приборов, известных в настоящее время. Он не имеет себе равных также в отношении радиационной стойкости, допуская облучение плотностью до 10^{14}—10^{16} *нейтрон/см*^{2}.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Преимущества и недостатки туннельных диодов по сравнению с электронными лампами, транзисторами и другими «активными» электронными приборами легче всего анализировать на конкретных примерах. Однако, прежде чем приступить к изложению принципов и конкретных примеров конструирования схем на туннельных диодах, полезно рассмотреть основные особенности туннельного диода как элемента радиотехнической схемы. Наиболее важные из них следующие.

Дифференциальное сопротивление $-r_д$ можно считать линейным в небольшой области 60—100 *мв* (вокруг точки перегиба U_0, рис. 6), в то время как в целом оно нелинейно и изменяется от $|-r_д|=\infty$ в точках $U_{(макс)}$ и $U_{(мин)}$ до $|-r_д|=r_{д.мин}$ (от десятых долей ома до килоомов, в зависимости от типа диода) в точке U_0.

Туннельный диод — двухполюсник, поэтому у него входные зажимы служат также и выходными.

Ток через диод резко увеличивается при очень малых напряжениях, в то время как у обычных диодов заметное увеличение тока начинается при $U\approx0{,}1$—0,5 *в*.

Падающий участок вольт-амперной характеристики расположен в области малых напряжений и занимает сравнительно небольшой интервал $U_{(мин)}-U_{(макс)}=$ $=100$—300 *мв*.

Именно этими особенностями определяются положительные и отрицательные свойства туннельных диодов при работе в радиотехнических схемах любого назначения. Эти особенности необходимо учитывать при расчетах и конструировании схем.

Благодаря нелинейности $-r_д$ (зависимости величины $-r_д$ от местоположения рабочей точки на характеристике) можно очень просто осуществлять частотную и амплитудную модуляцию, создавать несложные и эффективные схемы смесителей, многочастотных генераторов, регенеративных и сверхрегенеративных усилителей и детекторов. Однако та же самая нелинейность сужает динамический диапазон усилителей и ухудшает стабильность генераторов на туннельных диодах.

На туннельных диодах можно построить разнообразные переключающие импульсные схемы, конструирование которых на других электронных приборах либо сложно, либо вовсе неосуществимо. В частности, на одном туннельном диоде и шести сопротивлениях можно построить полный двоичный сумматор, транзисторный вариант которого требует более десяти транзисторов и большое количество полупроводниковых диодов и пассивных элементов.

Так как туннельный диод представляет собой двухполюсник, это облегчает построение схем генераторов. Однако создание многокаскадных схем затруднено из-за отсутствия у туннельного диода свойства однонаправленности (он одинаково усиливает сигналы как со входа на выход, так и с выхода на вход). Это свойство затрудняет согласование и разделение каскадов между собой.

Высокая кривизна характеристики вблизи нуля напряжения с успехом используется при построении детекторов и смесителей слабых сигналов

Схемы на туннельных диодах очень экономичны, но верхний уровень усиливаемой и генерируемой мощности у них сильно ограничен. Наконец, чрезвычайная широкополосность (от 0 до 10^{11} *гц*) и наличие отрицательного сопротивления позволили полупроводниковой электронике проникнуть в недоступный до недавнего времени диапазон сантиметровых и миллиметровых волн; однако эти же свойства предъявляют повышенные требования к монтажу и конструкции схем на низкой частоте, так как усилители на туннельных диодах очень легко возбуждаются даже при очень малых паразитных индуктивностях и емкостях.

Кроме перечисленных достоинств туннельного диода, следует указать на его хорошие шумовые характеристики. Он хотя и уступает в этом отношении мазерам и параметрическим усилителям, зато лучше транзисторов и электронных ламп. В настоящее время на туннельных

диодах созданы широкополосные усилители гигагерцового диапазона (10^8—10^{10} *гц*) с шум-фактором порядка 2 *дб*.

Универсальность туннельного диода и преимущества, получаемые при его использовании, можно показать на примере простой схемы, изображенной на рис. 7,*а* и *б*. Эта схема может выполнять функции генератора гармонических и релаксационных колебаний, усилителя, триг-

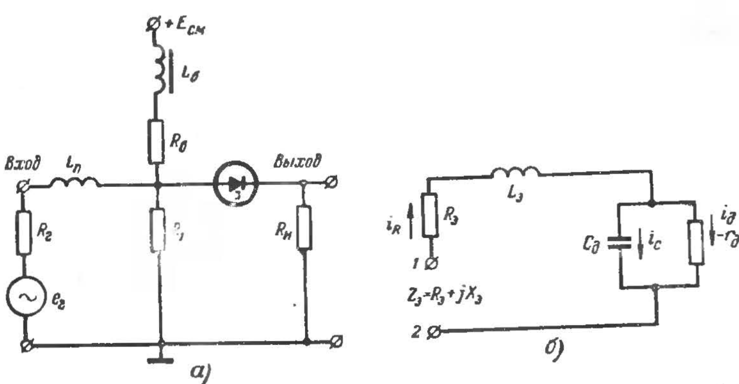


Рис. 7. Простейшая принципиальная схема на туннельном диоде (*а*) и эквивалентная схема (*б*).

гера, одновибратора и т. п. Замечательно то, что переход от одного типа схем к другому осуществляется только изменением величин компонентов схемы, без какого-либо изменения ее конфигурации.

На этом рисунке приняты следующие обозначения: $R_г$ и $R_н$ — сопротивления генератора и нагрузки; $L_п$ — общая паразитная индуктивность схемы; $E_{см}$ — источник смещения туннельного диода по постоянному току; $R_б$ и R_1 — делитель напряжения для получения необходимого смещения; $L_б$ — блокировочная индуктивность, предотвращающая прохождение переменного сигнала в источник смещения $E_{см}$; $R_э = R_н + \frac{R_г R_1}{R_2 + R_1}$ — эквивалентное активное сопротивление, включенное последовательно с диодом; $L_э = L_п + L_д$ — эквивалентная последовательная индуктивность; $-r_д$ — отрицательное дифференциальное сопротивление диода в рабочей точке; $C_д$ — суммарная емкость диода; $Z_э$ — полное (комплексное)

эквивалентное сопротивление схемы для переменного сигнала относительно входных зажимов; $R_э$ — действительная (активная) составляющая *z*; jX — мнимая (реактивная) составляющая *Z*.

Питание схем на туннельных диодах

Первая задача, которую необходимо решить при построении любой схемы, — это задание рабочей точки по постоянному току.

Как следует из вида вольт-амперной характеристики (рис. 2), для однозначного задания рабочей точки на ее падающем участке необходимо задавать постоянное смещение на туннельный диод от источника напряжения. Это означает, что сопротивление постоянному току (включая сюда и внутреннее сопротивление источника смещения), включенное последовательно с туннельным диодом, должно быть значительно меньше дифференциального сопротивления туннельного диода в рабочей точке *А*. Этому случаю соответствует линия нагрузки R_1, проведенная на рис. 6.

Такой режим питания используется в генераторах, усилителях и других «малосигнальных» схемах.

Поскольку абсолютная величина дифференциального сопротивления в рабочей точке обычно составляет единицы или десятки ом, то внутреннее сопротивление источника постоянного смещения должно быть примерно на порядок меньше, т. е. составлять десятые доли или единицы ом. При этом напряжение источника должно быть равно 100—300 *мв*. Легко подсчитать, что мощность, потребляемая туннельным диодом от батареи смещения, будет равна $I_0 U_0$ и при $I_0 = 5$ *ма* и $U_0 = 0{,}2$ *в* составляет 1 000 *мквт*. Наиболее подходящими источниками для питания генераторов и усилителей на туннельных диодах могут быть термогенераторы напряжением 0,1—0,3 *в*. Обычно же для питания устройств на туннельных диодах применяют стандартные элементы с напряжением в 1,5—2,2 *в*, а излишек напряжения «гасят» на балластном сопротивлении. В этом случае мощность, потребляемая от источника питания, будет значительно больше.

На рис. 8 показана типовая схема питания туннельного диода от источника с напряжением 1,5 *в*.

Если сопротивление R_1 выбрано намного меньше $|-r_д|$ и известно U_0, то величина балластного сопротивления R_3 находится по формуле

$$R_3 = \frac{E - U_0}{U_0} R_1, \quad (6)$$

где $R_3 = R_2 + R$.

Если $E = 1{,}5$ *в*, $U_0 = 0{,}2$ *в* и $R_1 = 2$ *ом*, то $R_3 = 13$ *ом*. При этом ток, потребляемый от батареи, будет равен $I = \frac{E}{R_3 + R_1}$, т. е. 100 *ма*, а расходуемая мощность $W = IE = 150$ *мвт*.

Если сопротивление постоянному току, включенное последовательно с диодом, будет намного больше его дифференциального сопротивления на падающем участке характеристики, то линия нагрузки будет соответствовать прямой R_2 на рис. 6. В этом случае прямая R_2 пересекает вольт-амперную характеристику в трех точках *А*, *Б* и *В*. В теории колебаний доказывается, что устойчивым положением равновесия будут соответствовать только точки *Б* или *В*, а точка *А* будет неустойчивой.

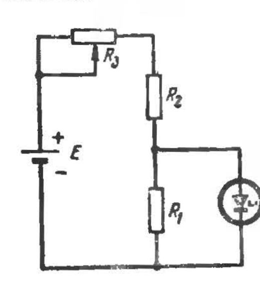


Рис. 8. Типовая схема питания туннельного диода.

Таким образом, если источник питания имеет внутреннее сопротивление $R_2 \gg |R|$, то рабочую точку на падающем участке характеристики задать невозможно. Такой режим питания используется при создании импульсных схем.

При повышенных требованиях к стабильности и работе в широком интервале температур окружающей среды неплохие результаты дает способ смещения генераторов и усилителей с помощью стабилизирующего диода *Д*, включенного в прямом направлении, как показано на рис. 9. При этом оказывается возможным, подобрав соответствующий диод *Д*, значительно скомпенсировать температурные изменения вольт-амперной характеристики туннельного диода.

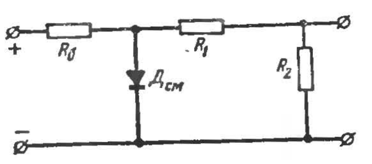


Рис. 9. Схема смещения туннельного диода с термокомпенсацией.

В качестве стабилизирующего диода можно использовать кремниевые или германиевые диоды с высокой крутизной характеристики в прямом направлении.

Такой способ смещения оказывается полезным и для ряда импульсных схем, в частности «пары Гото» (см. гл. 3).

Весьма простой и эффективный способ питания устройств на туннельных диодах заключается во встречном включении двух относительно высоковольтных источников напряжения (например, никелькадмиевых и свинцовых аккумуляторов). При этом непроизводительные затраты электроэнергии значительно снижаются. Разумеется, такой способ питания приемлем в случае, если это допускают габариты и вес устройства.

Генераторы и усилители синусоидальных колебаний

Возможность создания усилителей и генераторов электрических колебаний на туннельных диодах вытекает из того, что, так как положительное сопротивление рассеивает электрическую мощность, отрицательное сопротивление должно ее генерировать.

Однако следует сразу же предостеречь читателя от ошибочного вывода, что туннельный диод сам по себе может быть генератором электрической энергии, ибо это противоречит закону сохранения энергии. Дело в том, что «отрицательное сопротивление» служит удобным математическим символом, а не реальной физической величиной и означает лишь, что на каком-то участке вольт-амперной характеристики прибора увеличение напряжения уменьшает ток (и наоборот). Действительно, все известные в настоящее время приборы могут усиливать и генерировать электрические колебания лишь при подаче на них электрической энергии от внешних источников (аккумуляторов, батарей и т. п.). У таких устройств к. п. д. всегда меньше единицы, а отрицательное сопротивление в них выполняет функцию автоматического (в случае автогенераторов) или управляемого внешним сигналом (усилители) клапана, регулирующего поступление электрической энергии от источника питания в нагрузку.

Проще всего рассмотреть принцип действия усилителя с туннельным диодом на примере схемы, приведенной на рис. 10. Допустим, что генератор напряжения u с внутренним сопротивлением $R_г$ нагружен на $R_н$ (резистор $R_д$ замкнут). Максимальная мощность будет отдаваться в нагрузку при условии $R_н=R_г$ и будет равна:

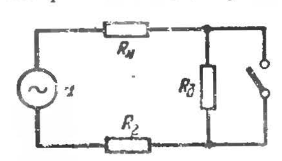


Рис. 10. Упрощенная эквивалентная схема усилителя с туннельным диодом.

$$P_{н.макс}=u^2/4R_г. \tag{7}$$

Если теперь включить последовательно с $R_г$ и $R_н$ резистор $R_д$, то мощность, выделяющаяся в $R_н$, будет равна:

$$P_н=\left(\frac{u}{R_н+R_г-R_д}\right)^2 R_н. \tag{8}$$

Из выражения (8) видно, что мощность в нагрузке при включении отрицательного сопротивления стала больше, чем $P_{н.макс}$. Например, при $|-R_д|=R_н=R_г$,

$$P_н=\frac{u^2}{R_г}=4P_{н.макс}. \tag{9}$$

Поскольку «усилительный» элемент — отрицательное сопротивление — является двухполюсником, обычные для ламповых и транзисторных схем понятия «вход» и «выход», «входная» и «выходная» мощности в данном случае неприменимы, и для количественной характеристики такого усилителя пользуются коэффициентом вносимого усиления по мощности $K_{р.вн}$. Этот коэффициент, равный отношению мощностей в нагрузке при включенном и выключенном отрицательном сопротивлении, показывает, какую мощность вносит в нагрузку активный двухполюсник (в данном случае — туннельный диод) по сравнению с пассивной цепью.

Для схемы на рис. 10 имеем:

$$K_{р.вн}=\frac{\left(\dfrac{u}{R_н+R_г-R_д}\right)^2 R_н}{u^2/4R_г}=\frac{4R_гR_н}{(R_н+R_г-R_д)^2}. \tag{10}$$

При $(R_н+R_г)\to|-R_д|$ коэффициент вносимого усилия стремится к бесконечности, схема становится неустойчивой, поэтому для нормальной работы такого усилителя необходимо, чтобы $R_г+R_н$ всегда было меньше, чем $|-R_д|$. Схема на рис. 10 представляет собой эквивалент «последовательного» усилителя на туннельном диоде для диапазона частот, в котором паразитными реактивностями диода можно пренебречь. На рис. 11 приведены графические построения, при помощи которых можно

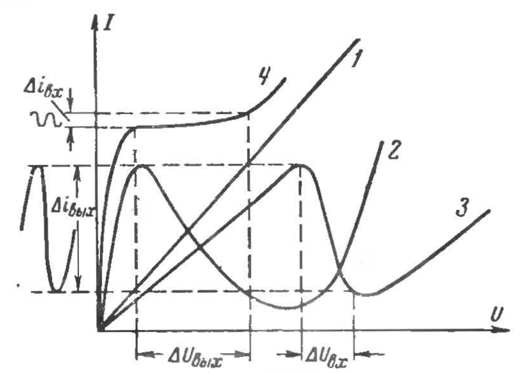


Рис. 11. Характеристика усилителя на туннельном диоде.

1 — полная нагрузочная характеристика; *2* — вольт-амперная характеристика диода; *3* — суммарная характеристика схемы последовательного усилителя; *4* — то же параллельного усилителя.

проанализировать работу последовательного и параллельного усилителей на туннельном диоде (схема параллельного усилителя получается при параллельном соединении $R_г$, $R_н$ и $-R_д$).

На практике, однако, пренебречь паразитными реактивностями диода в большинстве случаев не удается.

На рис. 7,*б* приведена эквивалентная схема усилителя с учетом реактивностей. Как видно, эта схема представляет собой соединение параллельного колебательного контура $L_э$, $C_д$, $R_э$ и отрицательного сопротивления $-r_д$. Если величина $|-r_д|$ окажется достаточной, чтобы скомпенсировать потери в контуре, то усилитель возбудится на частоте, определяемой параметрами контура. Для самовозбуждения схемы достаточно выполнить условия

$$R_э<|-r_д| \text{ и } L_э>R_э|-r_д|C_д.$$

Подставив типичные значения $C_д=20$ *пф*, $|-r_д|=20$ *ом*,

$R_э=15$ *ом*, получим, что для устойчивого усиления суммарная индуктивность схемы должна быть меньше: $L_э=20\cdot15\cdot20\cdot10^{-12}=6\cdot10^{-9}$ *гн* $=6$ *нгн*.

Сделать такой усилитель — задача достаточно трудная, поэтому, несмотря на простоту схемы и отличные шумовые и частотные характеристики, усилители на туннельных диодах находят применение лишь в УКВ и СВЧ диапазонах. Вторая трудность при построении усилителей вызвана тем, что туннельный диод представляет

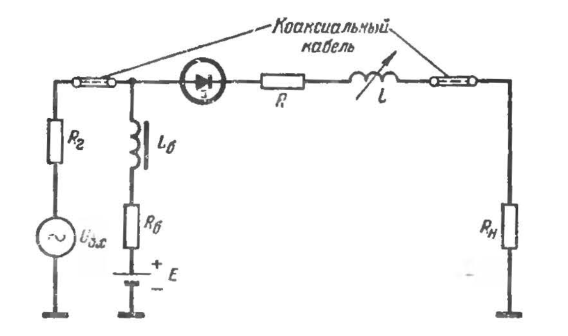


Рис. 12. Принципиальная схема «последовательного» усилителя.

собой двухполюсник, т. е. имеет общие зажимы для входа и выхода и одинаково усиливает в обоих направлениях. Это обстоятельство усложняет построение многокаскадных усилителей, особенно в диапазоне звуковых и радиочастот. В диапазоне СВЧ в качестве межкаскадной развязки применяют ферритовые ответвители и циркуляторы, в радиочастотном диапазоне эффективных способов пока не найдено.

Большинство практически реализованных усилителей на туннельных диодах — резонансного типа. Один из возможных вариантов такого усилителя приведен на рис. 12. Подстроечным элементом усилителя служит небольшая индуктивность L, включенная последовательно с нагрузкой, резонансный контур $LC_д$, батарея E совместно с резисторами $R_б$, $R_г$, R и $R_н$ задает рабочую точку по постоянному току. Индуктивность $L_б$ блокирует источник питания E по переменной составляющей. Современные усилители на туннельных диодах работают до частот порядка десятков гигагерц ($\lambda\approx1$ *см*) с коэффициентом усиления $K_{р.вп}=10^2\div10^4$ и шум-фактором до 2 *дб*.

Наиболее простыми из всех схем на туннельных диодах как по конфигурации, так и по технической реализации являются генераторы. Туннельный диод благодаря чрезвычайно широкому частотному диапазону, малой потребляемой мощности и высокой температурной стабильности является почти идеальным прибором для построения миниатюрных, высокостабильных, широкодиапазонных генераторов. То, что он двухполюсник, в данном случае не усложняет, а упрощает построение схем, так как в отличие от ламповых и транзисторных генераторов генераторы на туннельных диодах не требуют подачи внешней обратной связи (она получается в самом диоде). Единственный значительный недостаток генераторов на туннельных диодах — малая выходная мощность.

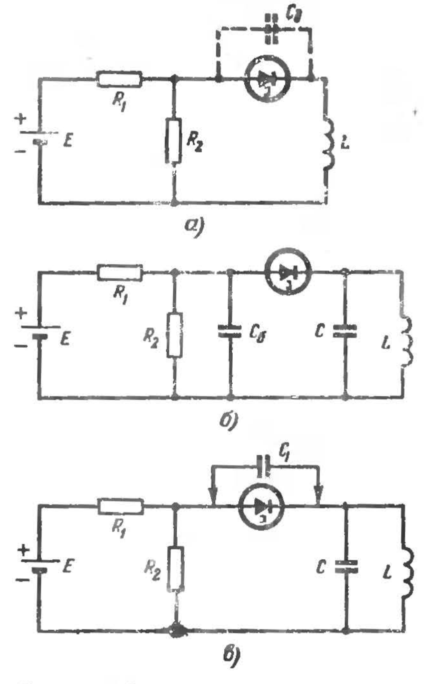


Рис. 13. Схемы генераторов синусоидальных колебаний.

а — последовательный; *б* — параллельный; *в* — параллельно-последовательный.

Простейшим генератором синусоидальных колебаний на туннельном диоде может служить схема, приведенная на рис. 13,*а* при выполнении условий самовозбуждения $|-r_д|>R_э$ и $L_э>R_э|-r_д|C_д$. При нормальной работе автогенератора рабочая точка туннельного диода должна быть смещена от источника постоянного напряжения в область вольт-амперной характеристики с отрицательным наклоном (*АБВ* на рис. 2). При этом суммарное

активное сопротивление, включенное последовательно с диодом, должно быть во всяком случае меньше $|-r_д|$. Если при этом $L_э \approx R_э|-r_д|C_д$, то колебания будут весьма близки к синусоидальным, но их амплитуда будет мала. При увеличении индуктивности амплитуда автоколебаний возрастает, однако увеличивается и содержание гармоник. Максимальный размах напряжения генератора примерно равен $U_{(мин)}-U_{(макс)}$. Максимальная мощность, которую может развить автогенератор на одном туннельном диоде, определяется из выражения

$$P_{макс}=\frac{1}{8}[U_{(мин)}-U_{(макс)}][I_{макс}-I_{мин}]. \qquad (11)$$

При этом рабочая точка совершает колебания от точки максимума (пика) вольт-амперной характеристики диода до точки минимума (впадины). Естественно, что при этом вследствие нелинейности характеристики вблизи этих точек форма колебаний будет значительно искажена. Если необходимо получить «чистую» синусоиду, приходится сильно уменьшать выходную мощность и амплитуду.

Типовое значение мощности для генераторов на одном туннельном диоде с пиковым током до 10 *ма* лежит в пределах от единиц милливатт до десятков микроватт. Для получения большей мощности необходимо применять диоды с большими пиковыми токами ($I_{макс}=$ 100 *ма* и выше) или использовать параллельное и последовательное соединение диодов. При $L_э \gg R_э|-r_д|C_д$ колебания становятся релаксационными и захватывают обе ветви характеристики с положительным наклоном, а размах выходного напряжения достигает величины $U_н$. Частота генерации схемы рис. 13,*а* определяется по формуле

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L_эC_д}-\frac{R_э}{L_эC_д|-r_д|}}. \qquad (12)$$

Амплитуду и форму колебаний можно изменять в широких пределах, изменяя отношение $L_э/C_д$, смещение по постоянному току (т. е. величину $|-r_д|$) и величину $R_э=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}$. Необходимо отметить, что, изменяя величину $|-r_д|$, мы будем изменять также и частоту генерации.

Это обстоятельство используется для частотной модуляции генераторов, электронной перестройки частоты, в преобразователях и т. п. Но по этой же причине простой последовательный генератор имеет не очень высокую стабильность. Лучшую стабильность можно получить, строя генератор по параллельно-последовательной схеме (рис. 13,*в*). Частота генерации такой схемы определяется по формуле

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{L(C+C_д)}-\frac{1}{|-r_д|^2C_д(C+C_д)}}, \qquad (13)$$

где $C_д$ — паразитная емкость туннельного диода.

При низких частотах генерации параллельно диоду обычно подключают дополнительную емкость (C_1). Для получения стабильных колебаний в этой схеме необходимо выполнять условие

$$R_э=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+R_п\approx\frac{|-r_д|}{1+\omega_0^2|-r_д|^2(C_1+C_д)^2}, \qquad (14)$$

где $R_п$ — сопротивление потерь туннельного диода.

Наибольшая выходная амплитуда достигается в параллельном генераторе, изображенном на рис. 13,*б*. Увеличение выходной амплитуды в этом генераторе происходит вследствие того, что конденсатор шунтирует по переменной составляющей сопротивление смещения, и активное сопротивление на частоте генерации практически равно сопротивлению потерь туннельного диода.

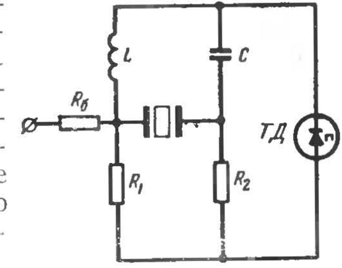


Рис. 14. Схема генератора с кварцевой стабилизацией.

Таким образом, последовательный генератор наиболее прост и имеет максимальную рабочую частоту, параллельный генератор — наибольшую выходную мощность, а параллельно-последовательный — наилучшую стабильность и форму сигнала.

Изображенная на рис. 14 схема генератора с кварцевой стабилизацией работает в основном, как и схема на

рис. 13,*в*. Изменяется лишь критерий выбора динамического сопротивления $R_э$. Его сопротивление на всех частотах, кроме частоты последовательного резонанса кварца, должно быть таким, чтобы выполнялись неравенства

$$L_э < R_э |-r_д| C_э \qquad (15)$$

$$R_э < |-r_д|. \qquad (16)$$

На рабочей частоте схемы, определяемой собственной частотой кварцевого резонатора, величина $R_э$ должна уменьшаться настолько, чтобы нарушалось первое из неравенств. В схеме на рис. 14 это достигается благодаря тому, что на частоте резонанса кварц имеет очень малое эквивалентное активное сопротивление и параллельно R_1 подключается R_2, практически отключенное на других частотах.

Релаксационные генераторы

Простейшая схема релаксационного генератора приведена на рис. 7. Режим релаксационных автоколебаний в этой схеме реализуется при выполнении условий:

$$R_э < |-r_д|$$

и

$$\frac{\sqrt{\frac{L_э}{C}}}{|-r_д|} + \frac{R_э}{\sqrt{\frac{L_э}{C}}} > 2,$$

причем переход от усилителя к релаксатору чаще всего осуществляется путем изменения величины L.

Чтобы избежать необходимости решения нелинейного дифференциального уравнения при определении периода колебаний релаксационного генератора, вольт-амперная характеристика туннельного диода должна быть линеаризована. На рис. 15 показан один из возможных вариантов линеаризации.

Если продолжить касательную к диодной характеристике из точки начала координат до пересечения с линией постоянного тока $I_{макс}$, то их пересечение произойдет приблизительно в точке, соответствующей $0{,}5\,U_{(макс)}$, следовательно, среднее значение напряжения при этом

токе равно $0{,}75\ U_{(мин)}$ и линеаризованное сопротивление первого восходящего участка будет:

$$R_{д1} = \frac{0{,}75U_{(макс)}}{I_{макс}}. \qquad (17)$$

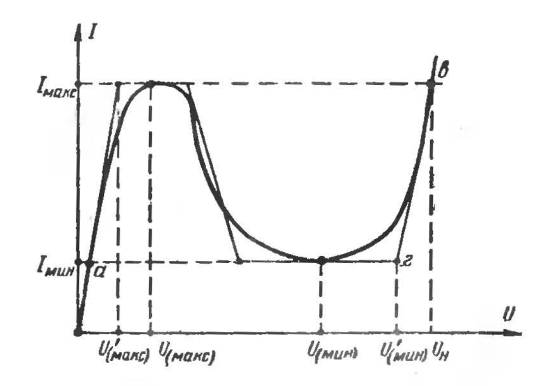


Рис. 15. Кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики туннельного диода.

Линеаризованное отрицательное сопротивление, усредненное по всему падающему участку характеристики (интегральное отрицательное сопротивление), будет равно:

$$-R_д \approx 0{,}4\,\frac{U_{(макс)} - U_{(мин)}}{I_{макс} - I_{мин}}, \qquad (18)$$

а линеаризованное сопротивление второго восходящего („диффузионного") участка будет равно:

$$R_{д2} = \frac{U_н - U'_{(мин)}}{I_{макс} - I_{мин}}, \qquad (19)$$

где

$$U'_{(мин)} \approx \frac{U_н + U_{(мин)}}{2}.$$

Время, необходимое для прохождения рабочей точки от *1* до *2* (рис. 16), будет равно:

$$t_1 = \frac{L_э}{R'_э} \ln \frac{E - R'_э I_{мин}}{E - R'_э I_{макс}}, \qquad (20)$$

где E — напряжение источника питания;

$R'_э$ — полное активное сопротивление схемы в низковольтном состоянии, включая $R_{д1}$.

Время, необходимое для снижения тока от точки *3* до точки *4*, можно определить из выражения

$$t_2 = \frac{L_э}{R''_э} \ln \frac{U_н + I_{макс}R - E}{U'_{(мин)} + I_{мин}R - E}, \quad (21)$$

где $R''_э = R_{д2} + R$ — полное активное сопротивление схемы в высоковольтном состоянии.

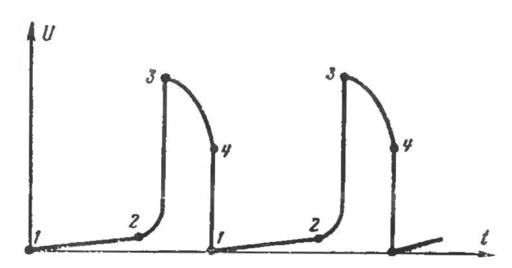


Рис. 16. Форма сигнала простейшего релаксатора.

Период релаксации будет:

$$T \approx t_1 + t_2. \quad (22)$$

Приведенная так называемая кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики туннельного диода значительно упрощает расчет релаксационных генераторов и переключателей. Точность расчетов при этом в большинстве случаев находится в пределах 10%. Следует отметить, что для расчета усилителей и гармонических генераторов такая аппроксимация непригодна; для этого класса схем наилучшим оказывается представление $i_д = f(u)$ в виде суммы двух экспонент, одна из которых убывающая, а вторая возрастающая.

Процессы, происходящие в схеме (рис. 7,*а*), когда она работает в режиме релаксационных колебаний, аналогичны процессам, происходящим в преобразователе напряжений, который будет рассмотрен более подробно ниже.

Преобразователи напряжения

Преобразователи напряжения низковольтных источников питания на полупроводниковых приборах получили широкое распространение благодаря их высокой надежности и долговечности.

Основу преобразователя обычно составляет генератор переменного напряжения синусоидальной или прямоугольной формы требуемой частоты. Напряжение от генератора с помощью трансформатора преобразуется до нужной величины и, если необходимо, выпрямляется и сглаживается фильтром.

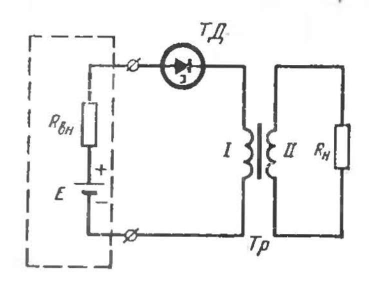


Рис. 17. Упрощенная схема преобразователя напряжения на туннельном диоде.

В качестве активных элементов преобразователей в большинстве случаев используются транзисторы, работающие в ключевом режиме.

Туннельные диоды также могут быть использованы как активные элементы генераторов в преобразователях. Особенность туннельного диода заключается в его способности работать от источников питания с малыми напряжениями (например, от термоэлементов). Преобразователь с туннельным диодом может работать на сравнительно высоких частотах (до нескольких сотен килогерц), что упрощает конструкцию трансформатора и фильтра выпрямителя.

Принципиальная схема преобразователя на туннельном диоде приведена на рис. 17. Индуктивность первичной обмотки *I* трансформатора, туннельный диод, источник питания E с внутренним сопротивлением $R_{вн}$ включены последовательно и образуют релаксационный генератор.

Параллельно вторичной обмотке трансформатора включено сопротивление нагрузки $R_н$.

Электрические процессы в таком преобразователе можно проследить, используя график на рис. 18. На этом графике показана характеристика туннельного диода с последовательно включенным сопротивлением $R_{вн}$. Ра-

бочие участки характеристики аппроксимированы прямыми линиями.

При начальном включении генератора напряжение и ток через диод возрастают. Рабочая точка перемещается по участку *ОАБ* (рис. 18). Быстрота движения рабочей точки определяется в основном индуктивностью L первичной обмотки трансформатора и напряжением E.

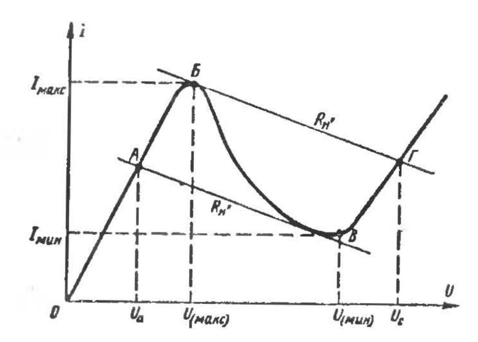


Рис. 18. Вольт-амперная характеристика туннельного диода и нагрузочные прямые преобразователя.

Когда ток i достигает $I_{\text{макс}}$, напряжение u быстро (скачком) изменяется до величины U_{c}, соответствующей точке *Г*. Наклон линий *АВ* и *БГ* соответствует приведенному к первичной обмотке сопротивлению нагрузки $R'_{\text{н}}$:

$$R'_{\text{н}}=R_{\text{н}}\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2. \tag{23}$$

Напряжение на индуктивности при этом меняет знак (так как $-U_{\text{c}}>E$) и ток i начинает уменьшаться. Когда ток i достигает $I_{\text{мин}}$ (рабочая точка при этом перемещается по участку *ВГ*), происходит скачкообразное изменение напряжения U до U_{a}, соответствующего точке *А*. Далее процессы повторяются. Рабочая точка перемещается по замкнутому контуру *АБВГ*.

Времена движения рабочей точки на участках *АБ* и *ВГ* зависят главным образом от напряжения питания E.

Наиболее устойчивый режим работы получается, когда времена движения на участках *АБ* и *ВГ* равны.

При этом форма напряжения на диоде и трансформаторе оказывается близкой к симметричному прямоугольнику.

Как правило, величина E при этом равна:

$$E\approx\frac{U_{(\text{мин})}+U_{(\text{макс})}}{2}. \tag{24}$$

Период колебаний T генератора можно найти приближенно по формуле

$$T\approx\frac{2L}{\dfrac{U_{(\text{макс})}}{I_{\text{макс}}}}\ln\frac{E}{E-U_{(\text{макс})}}. \tag{25}$$

Форма напряжения на первичной обмотке трансформатора показана на рис. 19.

Амплитуда переменного напряжения на первичной обмотке трансформатора примерно равна:

$$u_1\approx\frac{U_{(\text{мин})}-U_{(\text{макс})}}{2}, \tag{26}$$

на вторичной обмотке

$$u_2\approx n\,\frac{U_{(\text{мин})}-U_{(\text{макс})}}{2}, \tag{27}$$

где $n=n_1/n_2$ — коэффициент трансформации.

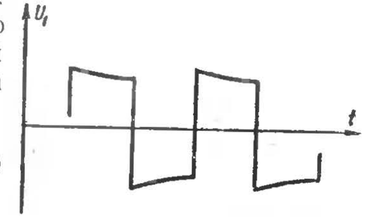


Рис. 19. Форма напряжения на первичной обмотке преобразователя напряжения.

Максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку, составляет:

$$P_{\text{н}}\approx\frac{n^2\left(U_{(\text{мин})}-U_{(\text{макс})}\right)^2}{8R_{\text{н}}}=\frac{\left(U_{(\text{мин})}-U_{(\text{макс})}\right)\left(I_{\text{макс}}-I_{\text{мин}}\right)}{8}. \tag{28}$$

Мощность, потребляемая от источника питания,

$$P_{\text{п}}=\frac{\left(U_{(\text{мин})}+U_{(\text{макс})}\right)\left(I_{\text{макс}}+I_{\text{мин}}\right)}{4}. \tag{29}$$

3—488

Максимальный коэффициент полезного действия будет:

$$\eta \approx \frac{(U_{(\text{мин})} - U_{(\text{макс})})\,(I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}})}{(U_{(\text{мин})} + U_{(\text{макс})})\,(I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}})}. \tag{30}$$

Минимальное сопротивление нагрузки, при которой преобразователь может работать, равно:

$$R_{\text{н. мин}} = \frac{U_{(\text{мин})} - U_{(\text{макс})}}{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}}. \tag{31}$$

При меньшем сопротивлении нагрузки релаксационные колебания срываются.

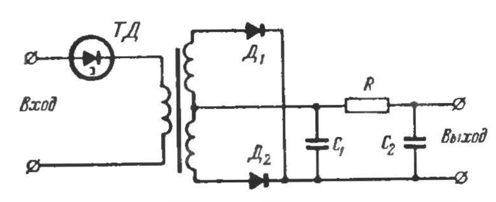


Рис. 20. Принципиальная схема преобразователя напряжения на туннельном диоде.

Для увеличения мощности, отдаваемой в нагрузку, можно включать параллельно несколько туннельных диодов одного типа.

Преобразователь по схеме на рис. 17 дает на выходе переменное напряжение. При добавлении двухполупериодного выпрямителя и фильтра (рис. 20) можно получить постоянное напряжение.

Выпрямленное напряжение на выходе преобразователя равно:

$$U_{\text{вых}} \approx \frac{n}{3}\,[U_{(\text{мин})} - U_{(\text{макс})}]. \tag{32}$$

Пример расчета основных характеристик преобразователя.

1. Туннельный диод из n-германия с условными параметрами:

$I_{\text{макс}} = 100$ *ма*;
$I_{\text{мин}} = 20$ *ма*;
$U_{(\text{макс})} = 40$ *мв*;
$U_{(\text{мин})} = 290$ *мв*.

2. Напряжение источника питания

$$E = \frac{U_{(\text{мин})} + U_{(\text{макс})}}{2} = \frac{290 + 40}{2} = 165 \text{ мв}.$$

3. Минимальное сопротивление нагрузки

$$R_{\text{н. мин}} = \frac{U_{(\text{мин})} - U_{(\text{макс})}}{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}} = \frac{290 - 40}{100 - 20} \approx 3{,}2 \text{ ом}.$$

4. Максимальная мощность на выходе

$$P_{\text{н}} = \frac{[U_{(\text{мин})} - U_{(\text{макс})}]\,[I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}]}{4} = \frac{[290 - 40]\,[0{,}1 - 0{,}02]}{4} \approx 5 \text{ мвт}.$$

5. Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{(290 - 40)\,(100 - 20)}{(290 + 40)\,(100 + 20)} \approx 0{,}5.$$

6. Ток, потребляемый от источника питания,

$$I_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta E} = \frac{5}{0{,}5 \cdot 0{,}165} \approx 60 \text{ ма}.$$

Трансформатор для преобразователя можно рассчитывать так же, как это делается в случае преобразователя на транзисторах. При рабочих частотах до 10 *кгц* можно использовать сердечники из трансформаторной стали или пермаллоя. На частотах выше 10 *кгц* необходимо применение тороидальных ферритовых сердечников.

Индуктивность первичной обмотки трансформатора определяется по формуле

$$L = \frac{U_{(\text{макс})}}{f I_{\text{макс}}}. \tag{33}$$

В выпрямителе по схеме на рис. 18 можно использовать любые диоды, рассчитанные на рабочее напряжение, равное $2U_{\text{вых}}$.

Емкости конденсаторов C_1 и C_2 и сопротивление резистора R можно определить из соотношений:

$$R \approx 0{,}05 R_{н},\ ом, \tag{34}$$

$$C_1 = C_2 = \frac{10}{f R_{н}},\ ф. \tag{35}$$

Переключающие схемы

Одна из наиболее обещающих областей применения туннельных диодов — переключающие устройства, где они могут использоваться в генераторах и триггерах или выполнять логические и запоминающие функции. Кроме того, они могут использоваться совместно с другими полупроводниковыми устройствами для выполнения самых разнообразных функций.

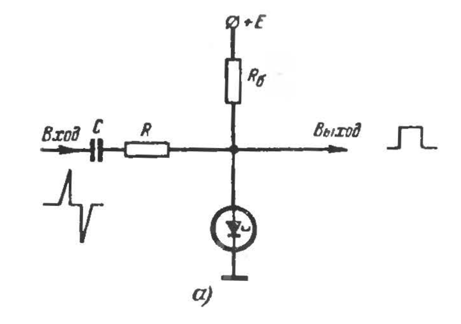
Как было показано ранее, любая схема с последовательным питанием туннельного диода будет переключающей, если общее положительное сопротивление схемы по постоянному току больше отрицательного сопротивления туннельного диода, т. е.

$$R_э > |-r_д|. \tag{36}$$

В этом случае туннельный диод может переключаться в любое из своих стабильных состояний. На рис. 21,*а* приведена простейшая схема триггера на одном туннельном диоде. Графически (рис. 21,*б*) переключательный режим работы получается при пересечении линии нагрузки с характеристикой туннельного диода в трех точках. В этом режиме при напряжении источника питания, равном U_1, только точки $А$ и $Б$ будут стабильными рабочими точками.

Причины неустойчивости рабочей точки $А$ (рис. 6) по постоянному току при $R_э > |-r_д|$ и устойчивости ее при $R_э < |-r_д|$ могут быть объяснены следующим образом.

Допустим, что схема на рис. 7,*б* находится в состоянии, соответствующем точке $А$ на рис. 6. При этом через диод и включенный последовательно с ним резистор $R_э$ течет ток I_0, а *p-n* переход и включенный параллельно ему конденсатор $C_д$ находятся под напряжением U_0. В соответствии с законами Кирхгофа токи и напряжения в схеме в любой момент времени должны удовлетворять условиям $i_R = i_д + i_C$ и $E = U_R + U_д$. Так как в стационарном состоянии ток i_C через $C_д$ равен нулю, то $i_R = i_д$. Поскольку в реальных схемах всегда существуют небольшие флуктуации токов и напряжений, то рабочая точка схемы не остается неподвижной. Допустим, что в



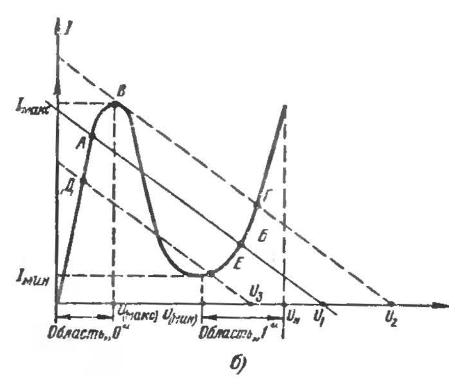


Рис. 21. Триггер на одном туннельном диоде.

а — принципиальная схема; *б* — графический анализ работы триггера.

какой-то момент времени напряжение на *p-n* переходе $U_д$ увеличилось до U'_0. При этом произойдет уменьшение токов, протекающих через $r_д$ и $R_э$, и потечет разностный ток через $C_д$. Если отрицательное сопротивление диода больше по абсолютной величине, чем $R_э$ (прямая R_1 на рис. 6), то разностный ток, равный $i_R - i_д$, будет разряжать емкость диода, стремясь возвратить рабочую точку в первоначальное положение $А$.

Если же $R_э > |-r_д|$ (прямая R_2 на рис. 6), то направление разностного тока будет обратным и приведет к подзаряду емкости диода и дальнейшему увеличению напряжения на нем, что в свою очередь вызовет увеличение разностного тока. Этот процесс будет протекать до тех пор, пока схема не достигнет точки *В*, в которой разностный ток обратится в нуль.

Аналогичный процесс будет и в том случае, если начальное отклонение от точки *А* произойдет в сторону уменьшения $U_д$.

При этом изменится только направление разностного тока и рабочая точка переместится в положение *Б*.

Нетрудно убедиться, что точки *Б* и *В* будут устойчивыми, если амплитуда возмущающего воздействия не будет превышать соответственно $U_{(макс)}—U_Б$ и $U_{(мин)}—U_В$, так как разностный ток при этом всегда будет возвращать схему в исходное состояние. Если же мгновенное приращение напряжения на диоде превысит указанные пределы, то произойдет необратимый процесс переброса схемы из точки *В* в точку *Б* или наоборот.

Если стабильная рабочая точка первоначально находится в точке *А* (рис. 21,*б*) и напряжение питания увеличивается до U_2, то ток схемы превышает максимальный ток ($I_{макс}$) туннельного диода (точка *В*) и происходит переключение его в точку *Г*.

При понижении источника питания до U_3 ток схемы становится меньше минимального тока (точка *Е*) и диод переключается в точку *Д*. Переключение туннельного диода из точки *А* в точку *Б* при постоянном питании U_1 произойдет, если на туннельный диод подать положительный импульс тока достаточной амплитуды, который увеличит ток диода до значения, превышающего максимальный ток ($I_{макс}$).

Из точки *Б* в точку *А* диод может переключиться при подаче импульса тока отрицательной полярности такой величины, которая уменьшит ток диода до значения, меньшего чем ток минимума ($I_{мин}$).

Переключение триггера на одном туннельном диоде можно осуществить и от импульсов одной полярности, но для этого нужно включить последовательно с резистором $R_б$ дифференцирующую индуктивность $L_п$ (рис. 7,*а*). Тогда при запуске импульсами тока положительной полярности переключение диода из состоя-

ния 1 в состояние 0 (из точки *Б* в точку *А*) произойдет по заднему фронту запускающего импульса.

Можно сказать, что в переключательном режиме используется пороговый принцип. Переключение происходит всякий раз, когда входные сигналы превышают этот порог, при этом процесс переключения необратим, т. е. если порог превышен и диод переключится в новое состояние, рабочая точка будет оставаться там независимо от того, будет или не будет оставаться сигнал на входе.

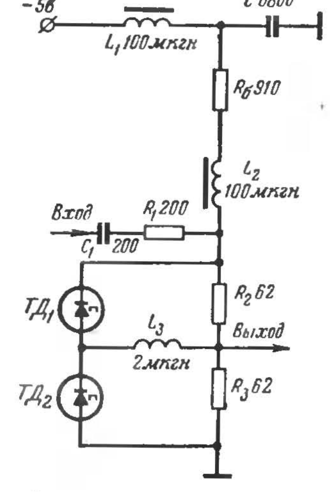


Рис. 22. Триггер на двух туннельных диодах.

При использовании туннельных диодов в схемах автоматики и в вычислительной технике, работающих в двоичной системе исчисления, низковольтная область обычно принимается за 0 (нуль), а высоковольтная область—за *1* (единицу).

В режиме переключения выходная амплитуда с переключающей схемы относительно постоянна и почти не зависит от амплитуды входного сигнала.

Усиление входного сигнала в переключательной схеме зависит от положения рабочей точки на характеристике диода, и чем ближе рабочая точка находится у порогового тока (экстремальная точка), тем меньшим током на входе можно запускать схему.

Триггер. Схема триггера на одном туннельном диоде приведена на рис. 21, работа такой схемы рассмотрена в предыдущем параграфе. Рассмотрим двухстабильную переключающую схему триггера на двух туннельных диодах (рис. 22).

Для устойчивой работы триггера должно выполняться необходимое условие: один туннельный диод (например, $ТД_1$) должен находиться в состоянии высокого напряжения, малого тока, (состояние 1), другой ($ТД_2$) — в состоянии низкого напряжения, большого тока (состояние 0). Разностный ток диодов течет через катушку

индуктивности L_3. При подаче на счетный вход триггера импульса тока (например, положительной полярности) произойдет переключение диода $ТД_2$ в состояние высокого напряжения, малого тока (в состояние 1). При переключении этого диода уменьшится ток через катушку L_3, т. е. начнется процесс изменения тока через индуктивность (разряд индуктивности). Направление тока таково, что возникающая э. д. с. переключит другой диод ($ТД_1$) в область низкого напряжения (0).

При подаче следующего положительного входного импульса процесс переключения протекает аналогично, с той лишь разницей, что диоды $ТД_1$ и $ТД_2$ меняются функциями.

В результате каждая пара запускающих импульсов завершит один цикл переключения. Триггер может запускаться и отрицательными импульсами.

Преимущества триггера на двух диодах: возможность работы от однополярных импульсов, лучшая форма выходных сигналов, симметрия по входу и выходу.

Выбор элементов схемы триггера. Для устойчивой работы триггера необходимо правильно выбрать режимы работы диодов и номиналы элементов схемы. Выбор их определяется следующими условиями.

Индуктивность катушки L_3 определяет время восстановления триггера. Поэтому для увеличения быстродействия схемы индуктивность этой катушки нужно выбирать минимальной при обеспечении неравенства

$$L_3/R_{2,3} > t_{\text{переключения}}, \quad (37)$$

т. е. постоянная времени цепи с индуктивностью должна быть больше времени переключения диода. В этом случае на процесс переключения не будут влиять внешние цепи, а индуктивность будет выполнять функцию запоминающего элемента при переключении диодов ($R_{2,3}$ — наибольшее из сопротивлений резисторов R_2 и R_3).

Сопротивления резисторов R_2 и R_3 определяют рабочую точку диода. Для работы триггера от минимальных входных сигналов сопротивления резисторов R_2 и R_3 нужно выбирать минимальными, перемещая тем самым рабочую точку диода ближе к точке тока минимума. Однако, учитывая температурные влияния на характеристику диода, сопротивления нужно выбирать на 20—30% больше максимального интегрального отрицательного сопротивления диода. Сопротивления резисторов R_2, R_3 определяют также разностный ток, протекающий через катушку L_3 в устойчивом состоянии триггера; при этом энергия, запасенная в индуктивности, прямо пропорциональна квадрату разностного тока, и чем больше запасенная в индуктивности энергия, тем устойчивее процесс переключения триггера.

Необходимая амплитуда тока входного переключающего импульса зависит от положения рабочих точек ($А$ и $Б$) диодов на их характеристиках. При нахождении рабочих точек близко к экстремальным значениям тока диодов для запуска триггера требуется минимальный импульс, а выходной импульс тока в этом случае будет максимальным и примерно равным разности токов диодов ($I_{\text{макс}}$—$I_{\text{А}}$), т. е. осуществится режим переключения тока.

Питать триггерную схему можно двумя способами — смещением по напряжению и смещением по току. В первом случае напряжение питания триггера определяется неравенством

$$U_{(\text{макс})} + U_{(\text{мин})} \leqslant E < 2U_{(\text{мин})}. \quad (38)$$

Это неравенство определяет условие, при котором два туннельных диода могут находиться только в противоположных состояниях. Например, диод $ТД_1$ — высокое напряжение (состояние 1), а диод $ТД_2$ — низкое напряжение (состояние 0).

В первом случае резистор $R_б$ отсутствует или его сопротивление так мало, что не принимается в расчет.

Во втором случае сопротивление резистора $R_б$ имеет большую величину — схема триггера питается от источника тока. Ток, проходящий через резистор $R_б$, равен суммарному току, проходящему через резистор R_2 и диод $ТД_1$, а также суммарному току, проходящему через резистор R_3 и диод $ТД_2$, независимо от того, в каком состоянии находятся диоды:

$$I_{\text{сум}} = i_1 + i_2 = i_3 + i_4. \quad (39)$$

Если диод $ТД_1$ находится в состоянии с низким напряжением, то суммарный ток, проходящий через резистор R_3 и диод $ТД_1$, равен:

$$i_1 + i_2 = I_{\text{А}} + \frac{U_{\text{Б}}}{R_2} \approx I_{\text{макс}} + \frac{U_{(\text{макс})}}{R_2}. \quad (40)$$

При расчете величина последнего члена получается на 10—20% выше истинного значения, так как рабочая точка A находится ниже экстремального значения. Вследствие относительной линейности характеристики диода в этой области (1) это учитывается постоянным коэффициентом смещения рабочей точки $k_{см} \approx 0{,}8$—$0{,}9$.

Принимая во внимание деление напряжения питания между балластным резистором $R_б$ и эквивалентным сопротивлением схемы триггера ($R_{экв}$), напряжение на схеме триггера должно удовлетворять неравенству

$$\frac{R_б + R_{экв}}{R_{экв}} (U_{(макс)} + U_{(мин)}) < E < 2U_{(мин)} \frac{R_б + R'_{экв}}{R'_{экв}}. \quad (41)$$

Одновременно должно удовлетворяться следующее равенство:

$$E = K_{см} \left(I_{макс} + \frac{U_{(макс)}}{R} \right) R_б + U_{(макс)} + U_{(мин)}, \quad (42)$$

где $R_{экв}$ — суммарное эквивалентное сопротивление схемы триггера при нахождении одного диода в состоянии 0, а другого в 1;

$R'_{экв}$ — суммарное эквивалентное сопротивление схемы триггера при нахождении двух диодов в состоянии высокого напряжения (в 1).

Минимальное сопротивление диода в состоянии 0 равно:

$$r_1 = \frac{U_{(макс)}}{I_{макс}}. \quad (43)$$

Максимальное сопротивление диода в состоянии 1 равно:

$$r_2 = \frac{U_{(мин)}}{I_{мин}}; \quad (44)$$

тогда

$$R_{экв} = \frac{Rr_1}{R + r_1} + \frac{Rr_2}{R + r_2}; \quad (45)$$

$$R'_{экв} = 2Rr_2/R + r_2. \quad (46)$$

Переходные процессы в схеме триггера. Процесс переключения туннельного диода может быть разделен

на два периода. Первый период представляет собой задержку, необходимую для перемещения рабочей точки до положения выше или ниже изгиба характеристики диода. Время задержки зависит от амплитуды входного запускающего сигнала, точнее — от коэффициента перевозбуждения, который представляет собой отношение амплитуды входного сигнала к разности экстремального ($I_{макс}$ для области 0 и $I_{мин}$ для области 1, рис. 21,*б*) и рабочего токов диода. В области задержки никакого заметного изменения напряжения на выходе не происходит. Второй период — увеличение напряжения на выходе — соответствует прохождению рабочей точки через область отрицательного сопротивления характеристики диода. Время, необходимое для этого, не зависит от амплитуды импульсов на входе, а зависит в основном от постоянной времени диода. Отсутствие зависимости времени нарастания напряжения на выходе от условий запуска означает, что время нарастания импульса не увеличивается при прохождении сигналом длинной цепи элементов, содержащих туннельные диоды.

Предполагая, что передний фронт запускающего импульса соизмерим с передним фронтом выходного импульса, время задержки выходного импульса можно выразить формулой

$$t_{зад} = R_п C \ln \frac{I_{пер} R_п}{I_{пер} R_п - U_0}, \quad (47)$$

а время нарастания переднего фронта при переключении диода из состояния 0 в состояние 1 выражается формулой

$$t_{пер} = \frac{U_п - U_{(макс)}}{I_{пер} - I_{мин}} C, \quad (48)$$

где $R_п$ — параллельное соединение сопротивления диода и сопротивления нагрузки;

C — суммарная емкость диода и нагрузки;

$I_{пер}$ — ток переключения — сумма токов (входного и смещения);

U_0 — напряжение, которое нужно преодолеть запускающему импульсу. При переключении диода из состояния 0 в состояние 1

$$U_0 \approx U_{(макс)}.$$

При переключении диода из состояния 1 в состояние 0 время переключения (задний фронт триггерного импульса) выражается формулой

$$t_{пер}=2{,}3|-R_{д}|C. \qquad (49)$$

Формула отражает условие, что схема триггера (рис. 22) переключается положительными импульсами, при этом диод $ТД_2$, находящийся в состоянии 1 (точка *Б* на рис. 21,*б*), начинает переключаться после переключения диода $ТД_1$ из состояния 0 в состояние 1 (из точки *А* в точку *Б*), т. е. после того, как началось перераспределение разностного тока в индуктивности. При этом постоянная времени цепи с индуктивностью намного больше времени переключения диода.

После переключения диодов начинается процесс восстановления триггера, по окончании которого схема опять готова к работе. Время восстановления в основном определяется постоянной времени цепи с индуктивностью (L_3/R), так как в катушке должен установиться ток противоположного направления.

При переключении диода из состояния 0 в состояние 1 это время равно:

$$t_{восст}=\frac{L}{R_{2,3}+r_1}\ln\left(\frac{I_{пер}}{I_{пер}-(I_{макс}-I_{мин})}\right). \qquad (50)$$

При переключении диода из состояния 1 в состояние 0 время восстановления выражается формулой

$$t'_{восст}=\frac{L}{R_{2,3}+r_1}\ln\frac{2(I_А-I_Б)}{I_{пер}-I_Б}. \qquad (51)$$

Максимальная частота работы триггера может быть определена из выражения

$$f_{макс}\approx\frac{1}{t_{зад}+t'_{пер}+t'_{восст}}. \qquad (52)$$

На основе триггера можно построить счетчики, регистры, сумматоры и другие устройства. Но соединение триггеров непосредственно между собой (без согласующего элемента) для построения счетчика, сдвигающего регистра и др. невозможно, так как триггер может переключаться как от положительного, так и от отрицательного входного импульса. При этом амплитуды запускающих импульсов приблизительно равны. Поэтому для надежной работы упомянутых устройств необходимы согласующие и формирующие элементы, которые ставят между триггерами при их последовательном соединении.

Формирователи импульсов. При передаче информации от одного логического элемента к другому или к нескольким необходим элемент связи, который должен обладать усилением, восстанавливать сигнал и обладать свойством направленности. В качестве элементов связи (формирователей) могут служить одновибраторы, которые будут выдавать импульсы заданной длительности с восстановлением амплитуды. Триггер на двух диодах можно преобразовать в формирователь.

Для этого достаточно включить в схему триггера туннельные диоды с неодинаковыми характеристиками, а еще проще выбрать сопротивление одного из резисторов R_2, R_3 меньше, чем отрицательное сопротивление диода. В зависимости от того, в верхней или нижней цепи триггера будет включен этот резистор, на выходе такой схемы (одновибратора) можно получить отрицательные или положительные импульсы. Одновибратор будет формировать импульс на выходе при каждом поступлении на его вход соответствующего запускающего импульса.

Формирователь можно построить и на одном диоде. Для этого нужно выбрать такой режим работы, чтобы линия нагрузки по постоянному току пересекала характеристику туннельного диода в области положительного сопротивления, как показано на рис. 23 (точка *А*, прямая *1*).

Динамическая линия нагрузки определяется индуктивной постоянной времени $L/R_б$, и для постоянной времени значительно большей, чем время, необходимое для переключения диода, динамическая линия нагрузки постоянна и параллельна оси напряжений.

Одновибратор на одном диоде (рис. 23,*б*) запускается от импульса тока положительной полярности и, если при этом суммарный ток (ток смещения и ток запуска) $I_A+I_{вх}$ окажется больше максимального тока диода ($I_{макс}$), диод переключится в состояние с высоким напряжением.

Вследствие включенной в цепь питания катушки индуктивности L ток диода мгновенно измениться не сможет, и в первый момент после переключения через диод будет протекать максимальный ток, равный сумме тока смещения и тока входного импульса $(I_A+I_{вх})$, а напряжение на диоде будет несколько больше, чем $U_н$ (точка B на рис. 23,*а*).

По мере убывания амплитуды запускающего импульса и рассеивания на нагрузке энергии, накопленной в катушке индуктивности L, рабочая точка будет опускаться по диодной характеристике, минуя точку $Г$ до точки минимального тока $Д$.

Процесс убывания напряжения и тока через туннельный диод протекает по экспоненциальному закону и обусловлен тем, что напряжение источника питания $E_{см}$ значительно меньше напряжения, необходимого для того, чтобы обеспечить положение рабочей точки на второй восходящей (диффузионной) ветви вольт-амперной характеристики диода $(E_{см}<U_{мин})$. Когда рабочая точка попадает в точку $Д$, снова произойдет переключение диода (в точку E). После этого начнется процесс восстановления тока в катушке индуктивности до его первоначального значения, и рабочая точка благодаря постоянному смещению переместится в точку A. На этом рабочий цикл формирования импульса заканчивается. Таким образом, при запуске одновибратора импульсом

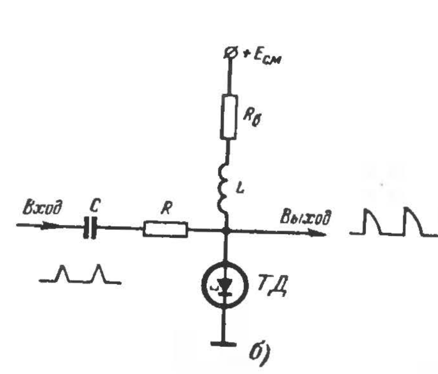


Рис. 23. Одновибратор на одном туннельном диоде.
а — графический анализ работы; *б* — принципиальная схема.

положительной полярности на выходе получается сформированный импульс той же полярности.

Каждый участок диаграммы цикла переключения одновибратора (рис. 23,*а*) соответствует определенным процессам работы схемы. Так, отрезок $AБ$ между точками тока смещения и максимального тока диода соответствует времени задержки выходного импульса относительно входного. На отрезках $БВ$ и $ДЕ$ формируются передний и задний фронты выходного импульса (соответственно происходит переключение диода). При этом время переключения в основном определяется величиной отрицательного сопротивления диода и емкостью схемы. Отрезки $ВД$ и EA соответствуют восстановительным процессам цепи с индуктивностью L. На отрезке $ВД$ формируется длительность выходного импульса, а на отрезке EA происходит восстановление схемы до исходного состояния.

Длительность этих процессов полностью определяется постоянной времени цепи с индуктивностью и зарядным током.

На выходе одновибратора можно при положительном смещении получить импульс отрицательной полярности, но для этого рабочая точка диода должна находиться около точки $Д$ (прямая 2, точка $Ж$). Запуск одновибратора в этом случае осуществляется импульсом отрицательной полярности, при этом нагрузочный ток одновибратора может быть не более разности токов $I_{пер}—I_{макс}$.

Одновибратор с выходным импульсом положительной полярности может в идеальном случае иметь ток нагрузки $(I_{пер}—I_{мин})$ при лучшем переднем фронте, чем у одновибратора с выходным импульсом отрицательной полярности. Поэтому одновибраторы со смещением рабочей точки на высоковольтный участок характеристики используются редко. Из рассмотренного следует, что полярность выходного импульса формирователя на туннельном диоде соответствует полярности входного импульса независимо от выбора рабочей точки.

Рассматриваемый одновибратор с рабочей точкой в низковольтной области питается от низковольтного источника напряжения (200—300 *мв*). Практически это не всегда осуществимо, поэтому одновибраторы обычно питают от сравнительно высоковольтных источников

с низкоомными делителями напряжения. На рис. 24 приведена схема одновибратора с таким делителем напряжения.

Сопротивление резистора R_0 должно быть меньше отрицательного сопротивления диода. Изменяя сопротивление балластного резистора $R_б$, можно получить необходимое смещение рабочей точки диода. Принцип работы одновибратора (рис. 24) с параллельным сме-

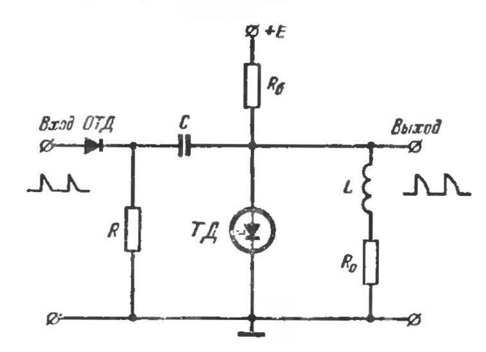


Рис. 24. Одновибратор с параллельным смещением.
ОТД — обращенный туннельный диод.

щающим резистором R_0 не отличается от принципа работы одновибратора с последовательным смещением диода, так как процессы переключения тока у них одинаковы.

В отличие от рассмотренного одновибратора с последовательным смещением диода диод одновибратора с параллельным смещением питается от источника E, имеющего напряжение большее, чем $U_н$. При переключении диода (перемещении рабочей точки на рис. 23,*а* из *Б* в *В*) увеличение напряжения на нем до $U_н$ происходит не только за счет сигнала, как у одновибратора на рис. 23,*б*, но и за счет источника питания E, так как увеличение сопротивления диода при его переключении изменяет коэффициент деления напряжения.

Выражение для напряжения смещения на диоде в исходном состоянии имеет вид:

$$U_{см} = \frac{R_{экв}}{R_б + R_{экв}} E. \qquad (53)$$

При переключении диода в высоковольтное состояние эквивалентное сопротивление схемы увеличится до суммы $R_{экв} + R'_{экв}$. Если предположить, что наклон восходящих ветвей диодной характеристики (области *1* и *0* на рис. 2) одинаков, то напряжение смещения будет:

$$U'_{см} = \frac{R_{экв} + R'_{экв}}{R_б + (R_{экв} + R'_{экв})} E, \qquad (54)$$

где

$$R_{экв} = \frac{R_0 r_1}{R_0 + r_1};$$

$$R'_{экв} = \frac{R_0 r_2}{R_0 + r_2}.$$

В результате увеличения напряжения смещения во время переключения диода амплитуда сигнала на выходе схемы может быть больше, чем $U_н$.

Запускающий импульс тока должен переключать одновибратор с заданной задержкой, которую можно определить по формуле (47). Если пренебречь емкостью диода, единственное требование к запуску состоит в том, чтобы ток $I_{пер}$ запускающего импульса в сумме с током смещения был больше максимального тока диода.

На основе одновибратора на туннельном диоде можно построить элемент, выполняющий функцию совпадений И или собирательную функцию ИЛИ.

Элемент И на два-три входа строится на известном принципе пороговой логики, который состоит в том, что запуск одновибратора произойдет, если при совпадении входных сигналов во времени сумма входных токов будет превышать максимальный ток диода.

Элемент ИЛИ на два и более входов выполняется простым объединением входов. Запускающий импульс тока по любому входу в сумме с током смещения должен превосходить максимальный ток диода.

При объединении элементов для образования сложных функциональных схем, для исключения их взаимного влияния элементы разделяются резисторами и обращенными туннельными диодами (рис. 24).

Обращенный диод представляет собой по существу туннельный диод, работающий в обратном направлении

и имеющий малый ток максимума. Вольт-амперная характеристика обращенного диода имеет вид вольт-амперной характеристики туннельного диода, повернутой в плоскости на 180° (рис. 23,*а*).

Если к обычному туннельному диоду приложить напряжение в обратном направлении, то потечет большой ток, который будет монотонно возрастать при увеличении напряжения. Если напряжение, отмеченное на рис. 23;*а* точкой *Д*, приложить к туннельному диоду в обратном направлении, то результирующий ток будет намного больше, чем при напряжении, приложенном в прямом направлении.

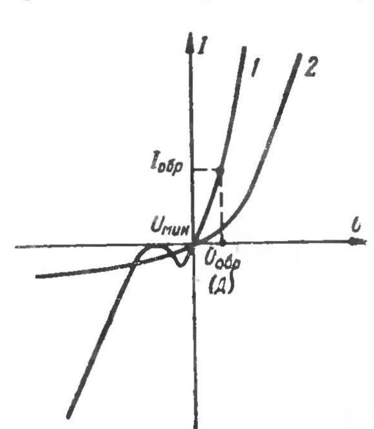


Рис. 25. Вольт-амперные характеристики обращенного (*1*) и обычного (*2*) диодов.

Максимальный ток обращенного диода обычно много меньше максимального тока обычных туннельных диодов (не превышает 50—100 *мка*), так как большой ток при включении обращенного диода с прямым смещением нежелателен по той же причине, что и ток утечки при обратном напряжении на обычном диоде.

На рис. 25 приведены для сравнения характеристики обычного и обращенного диодов. Из характеристик видно, что обращенные диоды могут работать с относительно малыми (порядка 0,1 *в*) сигналами и благодаря туннельному механизму протекания тока на значительно более высоких частотах, чем обычные диоды.

Функции обращенных диодов могут выполнять и обычные туннельные диоды со значительно меньшим пиковым током по сравнению с пиковым током туннельных диодов, выполняющих обычные функции. Так, если в качестве туннельного диода в схеме на рис. 24 используется диод с $I_{макс}=10$ *ма*, то вместо обращенного туннельного диода можно поставить туннельный диод с $I_{макс}=1—2$ *ма*.

Комбинированные переключающие схемы на туннельных диодах и транзисторах

В автоматике и вычислительной технике, помимо схем, построенных на туннельных диодах, широко применяются комбинированные схемы, построенные на туннельном диоде и транзисторе.

Имея хорошую частотную характеристику, туннельный диод не обладает свойством направленности при передаче информации и работает при относительно низких напряжениях. Это затрудняет его использование в исполнительных переключающих схемах. Совместное использование туннельных диодов и транзисторов позволяет довольно просто получить сравнительно высокие уровни рабочих напряжений, развязать входные цепи от выходных и получить инвертирование сигнала. Комбинированные схемы могут повысить надежность работы устройства, упростить его наладку, уменьшить габариты и потребляемую мощность по сравнению с устройствами, выполненными только на одном типе прибора.

Комбинированная схема на транзисторах и туннельных диодах может быть получена путем соединения перехода база — эмиттер транзистора с туннельным диодом, как это показано на рис. 26.

Ток $I_б$, имеющий величину, несколько меньшую максимального тока диода, смещает его в состояние низкого напряжения (0).

В исходном состоянии транзистор заперт Если на вход схемы подается положительный импульс, туннельный диод переключается в состояние высокого напряжения (1) и транзистор отпирается, причем основная часть тока смещения диода ответвляется в базу транзистора (рис. 26,*б*) и может ввести его в режим насыщения. Следующий (отрицательный) импульс на входе уменьшит ток туннельного диода до величины, меньшей тока минимума, и переключит туннельный диод в низковольтное состояние (0), заперев таким образом транзистор.

Резистор *R*, соединенный последовательно с диодом, предохраняет диод на высоковольтном участке от шунтирования низкоомным входным сопротивлением транзистора. Небольшая разделительная индуктивность *L* позволяет исключить влияние базовой цепи транзистора на туннельный диод в момент переключения.

Включение туннельного диода с транзистором (рис. 27,*а*) позволяет получить S-образную характеристику отрицательного сопротивления (рис. 27,*б*).

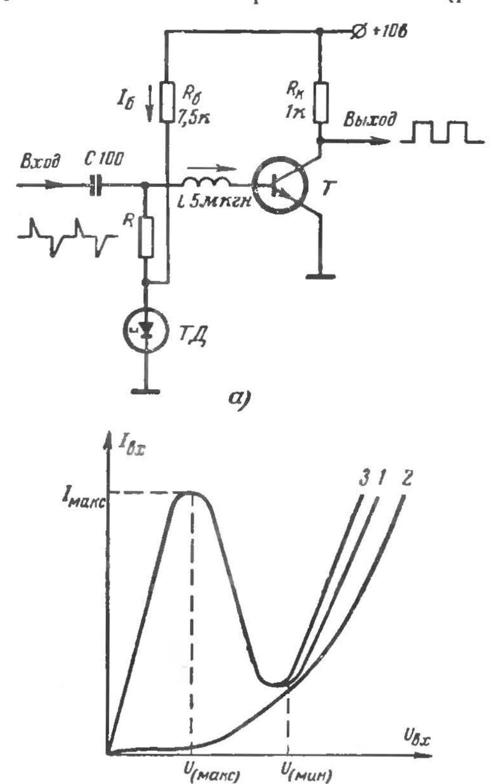


Рис. 26. Триггер на туннельном диоде и транзисторе.

а — принципиальная схема; *б* — статические вольт-амперные характеристики (*1* — туннельного диода; *2* — входная характеристика транзистора; *3* — входная характеристика схемы триггера).

В исходном состоянии транзистор заперт, диод находится в состоянии 0 и эквивалентная схема цепи может быть представлена последовательно включенными туннельным диодом и резистором R_1. Когда ток в этой цепи достигнет величины максимального тока диода ($I_{макс}$),

произойдет переключение диода в состояние 1, транзистор отопрется и ток резко возрастет. Для нормальной работы схемы необходимо применять транзисторы с на-

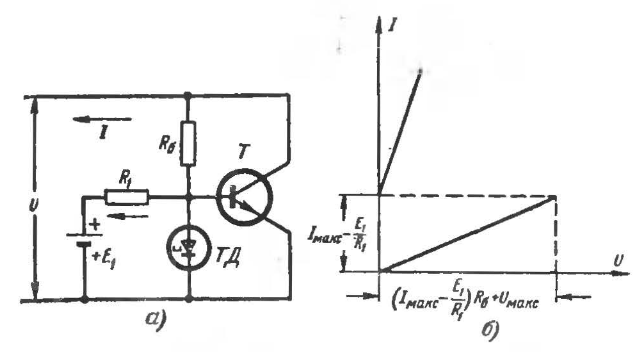


Рис. 27. Комбинированная схема с S-образной характеристикой.

а — принципиальная схема; *б* — S-образная вольт-амперная характеристика.

пряжением отсечки коллекторного тока меньшим, чем напряжение минимума туннельного диода. Минимальное насыщение транзистора и идеальная S-образная характеристика получаются путем введения дополнительного смещения E в базу транзистора. Используя S-образную характеристику такой цепи, можно создать генератор прямоугольных импульсов, схема которого приведена на рис. 28.

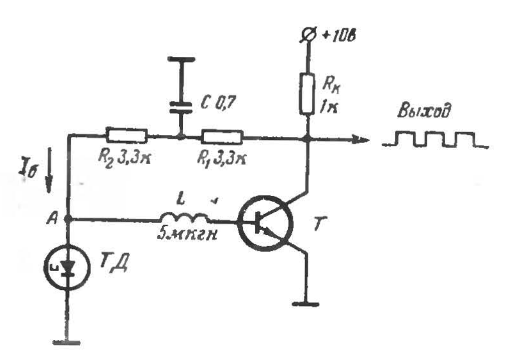


Рис. 28. Генератор прямоугольных импульсов с использованием S-образной характеристики.

В исходном состоянии транзистор заперт, диод находится в состоянии 0. Цикл работы начинается с заряда конденсатора C через резисторы $R_к$ и R_1. Когда ток через резистор R_2 достигнет $I_{макс}$, диод переключится в состояние 1, транзистор отопрется и его ток дойдет до насыщения, а потенциал коллектора транзистора упадет до нуля. Затем конденсатор C будет разряжаться через резисторы R_1 и R_2 до тех пор, пока напряжение в точке A не упадет ниже напряжения минимума туннельного диода. После этого диод возвратится в исходное состояние 0 и транзистор запрется. Затем цикл повторится снова. Скважность выходного сигнала можно изменить, включив в цепь базы транзистора дополнительный источник смещения.

Для четкой работы схемы необходимо выполнить следующие условия:

1. Когда транзистор заперт, ток смещения через резистор R_2 должен достичь $I_{макс}$ раньше, чем зарядится конденсатор C.

2. Когда диод находится в состоянии 1, ток транзистора должен дойти до насыщения.

3. Время переключения транзистора должно быть меньше времени заряда конденсатора.

В схемах с туннельным диодом в базе транзистора диод выполняет функцию запоминания, а транзистор — усилителя сигнала с диода; транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером, должен обладать высокими усилительными свойствами.

Комбинационные переключающие схемы с туннельным диодом и транзистором, включенным по схеме с общей базой. Схема, изображенная на рис. 29, представляет собой триггер с раздельными выходами 0 и 1.

Туннельный диод питается от источника тока $I_б$. В исходном состоянии диод находится в состоянии 0, ток $i \approx I_{макс}$ диода проходит через переход эмиттер — база транзистора T_2, коллекторный ток создает падение напряжения на резисторе R_2. Высокий потенциал на транзисторе T_2 соответствует состоянию 0 схемы.

Допустим, что в данный момент времени транзистор T_1 заперт, так как напряжения $U_{(макс)}$ диода недостаточно для его отпирания. При поступлении на вход положительного импульса тока необходимой величины диод переключается в состояние 1. В результате пере-

ключения диода в высоковольтное состояние транзистор T_1 отопрется и большая часть тока переключится в его эмиттер. Коллекторный ток транзистора T_1 создаст падение напряжения на резисторе R_1 (выход 1). Переключившийся диод нагружается на сопротивление перехода эмиттер — база транзистора T_1, которое должно быть значительно меньше, чем сопротивление диода в состоянии 1. В этом случае через переход эмиттер — база

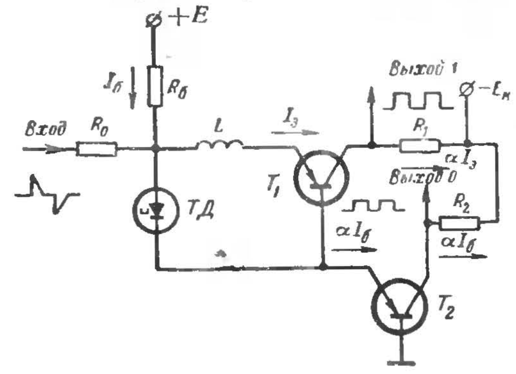


Рис. 29. Триггер с раздельными выходами 0 и 1.

транзистора T_2 проходит относительно малый ток и на выходе транзистора T_2 будет потенциал, близкий к $E_к$.

Второй запускающий импульс тока (отрицательной полярности) вернет схему в нулевое состояние.

Для работы описанной схемы необходимо выбирать такие туннельные диоды и транзисторы, чтобы сопротивление эмиттер — база транзистора T_1 было больше отрицательного сопротивления диода на 20—30%, тогда диод не будет самопроизвольно переключаться из состояния 1 в состояние 0.

Высокую скорость переключения и сравнительно малую чувствительность к изменению питающих напряжений и разбросу параметров деталей можно получить в комбинированной переключающей схеме, состоящей из транзистора, включенного по схеме с общей базой, и туннельного диода в коллекторной цепи транзистора (рис. 38, одновибратор с запуском от транзистора). В данной схеме транзистор выполняет разделительную

функцию при передаче информации, а туннельный диод используется в качестве формирующего элемента.

Схема одновибратора с запуском от транзистора применяется в счетчике для разделения входных цепей от выходных, для формирования и восстановления сигнала. Длительность выходного импульса одновибратора прямо пропорциональна величине индуктивности и обратно пропорциональна сопротивлению R_3.

Особое значение в работе одновибратора с транзистором имеет резистор R_4 — он уменьшает выходное сопротивление транзистора, что необходимо, так как сопротивление коллектор — база транзистора велико, а увеличение сопротивления источника запускающих импульсов приводит к задержке переключения и к уменьшению сигнала на выходе (рис. 38).

Сопротивление R_4 смещает диод *ТД* по току и тем самым уменьшает ток, проходящий через транзистор. Использование для постоянного токового смещения диода резистора R_4 особенно ценно при работе с диодами, максимальный ток которых превышает допустимый рабочий ток транзистора.

Поскольку перепады напряжения, необходимые для управления диодом, малы, от транзистора не требуется большого коэффициента усиления по напряжению, т. е. он может работать на частоте, близкой к частоте отсечки. Схема отличается сравнительно малой критичностью к разбросу параметров деталей, а также к величинам питающих напряжений.

Комбинационные переключающие схемы с туннельным диодом и транзистором, включенным по схеме с общим коллектором. Включение туннельного диода в эмиттерную цепь транзистора позволяет уменьшить управляющий ток, необходимый для переключения диода, в β раз.

На рис. 30 показана схема, выполняющая функцию «исключительного ИЛИ». Выходной сигнал снимается с коллекторной нагрузки.

Статическая вольт-амперная характеристика схемы приведена на рис. 30,*б*. Она представляет собой суммарную вольт-амперную характеристику *p-n* перехода эмиттер — база и туннельного диода, включенных последовательно.

Схема управляется от источника напряжения. В исходном состоянии сигнал на входе устройства отсутствует; рабочая точка диода находится на начальном участке вольт-амперной характеристики; ток, протекающий через транзистор, мал; выходное напряжение приблизительно равно $E_к$.

При раздельном приходе сигнала на вход схемы рабочая точка диода смещается в область, близкую к току $I_{макс}$ диода, но остается в области 0, ток коллектора возрастает, падение напряжения на $R_к$ тоже возрастает, при соответствующих параметрах схемы может наступить

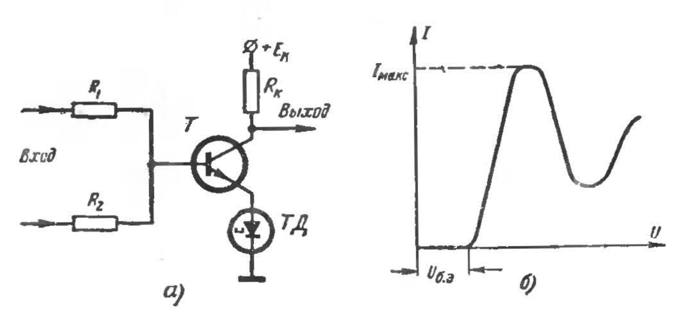


Рис. 30. Схема, выполняющая логическую функцию исключительное ИЛИ.

а — принципиальная схема; *б* — входная вольт-амперная характеристика.

режим насыщения транзистора. При подаче сигналов одновременно на оба входа диод переключается в состояние 1, в область, близкую к току минимума ($I_{мин}$), напряжение же на выходе опять близко к напряжению питания $E_к$.

Делители частоты. В качестве делителей частоты и счетчиков часто используют схемы, состоящие из цепочки последовательно включенных туннельных диодов, выполняющих функцию деления и запоминания, и одного или нескольких транзисторов для вспомогательных функций.

На рис. 31 приведены схема счетчика с коэффициентом деления 5 и составная вольт-амперная характеристика пяти диодов. Каждый входной импульс делителя переключает только один диод.

Обязательное условие нормальной работы схемы состоит в том, чтобы диоды $ТД_1$—$ТД_4$ переключались раньше диода $ТД_5$. Для этого они должны иметь макси-

мальный ток ($I_{макс}$) (или емкость перехода) меньше, чем у диода $ТД_5$.

Когда на вход делителя приходят четыре запускающих импульса тока, диоды $ТД_1$—$ТД_4$ вводятся в состояние 1, пятый импульс переключит диод $ТД_5$ в состояние 1, отопрет транзистор и введет его в режим насыще-

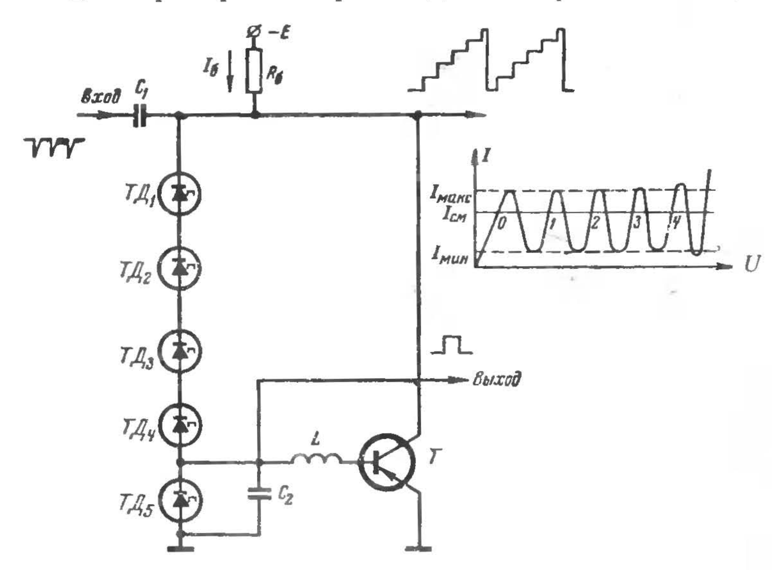


Рис. 31. Схема делителя частоты с коэффициентом деления 5.

ния; в результате этого диоды $ТД_1$ и $ТД_5$ будут «сброшены» в состояние 0. При этом диод $ТД_5$ должен «переключиться» в состояние 0 последним. Для этого ток минимума диода $ТД_5$ должен быть меньше $I_{мин}$ — тока минимума диодов $ТД_1$—$ТД_4$.

Чтобы происходило полное переключение диодов $ТД_1$—$ТД_5$, применены конденсатор C_2 и катушка L, которые задерживают передачу сигнала на вход транзистора. Сигнал на выходе делителя имеет ступенчатую форму, причем время нарастания каждой ступеньки определяется временем нарастания входного импульса. Рабочая частота делителя ограничивается главным образом скоростью переключения транзистора.

Следует иметь в виду, что для правильной и устойчивой работы схемы смещение туннельных диодов долж-

но осуществляться от источника тока. Однако в случае применения диодов с $I_{макс}=5$ *ма* или выше для этого может потребоваться слишком большая величина E. В таком случае оказывается более выгодным смещать диоды с помощью дополнительного транзистора, включенного по схеме с общей базой.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ НА ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДАХ

Выпускаемые в настоящее время туннельные диоды (справочные данные нескольких отечественных диодов даны ниже) позволяют создавать самые разнообразные радиотехнические схемы: смесители, генераторы и детекторы УКВ и СВЧ диапазонов, триггеры, логические элементы для сверхбыстродействующих вычислительных и кибернетических устройств и т. п. Принципы построения основных типов схем на туннельных диодах, их особенности и некоторые упрощенные методы их инженерного расчета были изложены в предыдущей главе книги. Там же в качестве иллюстраций было рассмотрено несколько конкретных схем.

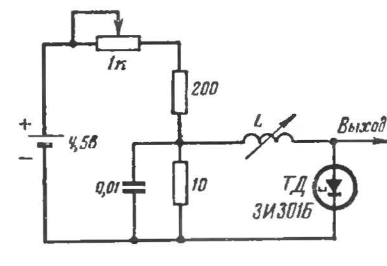


Рис. 32. Генератор прямоугольных импульсов.

Естественно, что описать все возможные случаи применения туннельных диодов практически невозможно. Поэтому ниже приведено лишь ограниченное количество простейших схем, которые можно использовать в радиолюбительской практике, но которые ни в коей мере не исчерпывают схемных возможностей туннельного диода.

На рис. 32 дана схема простого генератора почти прямоугольных импульсов. Для нормальной работы генератора нагрузочная линия постоянного тока должна пересекать характеристику туннельного диода лишь в одной точке (рис. 6). Если эта точка расположена на

участке характеристики с отрицательным наклоном (точка A, рис. 6), то генератор начнет работать при включении питания.

Изменяя индуктивность катушки L, можно изменять частоту следования импульсов от сотен килогерц до нескольких мегагерц. Рассчитать схему можно по соотношениям (17)—(22).

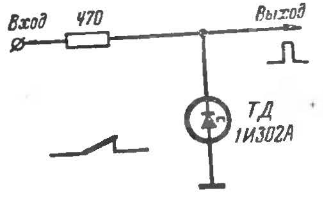


Рис. 33. Амплитудный селектор.

Если изменить смещение на диоде так, чтобы точка пересечения линии нагрузки с характеристикой оказалась вне участка отрицательного сопротивления (например, точка A на рис. 23), то схема будет работать как одновибратор. При запуске такого одновибратора от внешнего генератора он будет вырабатывать импульсы постоянной амплитуды и длительности с частотой запуска.

Простейший амплитудный селектор, состоящий из туннельного диода и резистора, изображен на рис. 33. Путем изменения сопротивления резистора можно менять порог срабатывания в широких пределах, однако во всех случаях должно выполняться условие

$$R > \frac{U_{(мин)} - U_{(макс)}}{I_{макс} - I_{мин}}. \qquad (55)$$

Таким образом, минимальный уровень селектируемого сигнала для данного типа диода будет около 500 *мв*. Селектор надежно срабатывает от импульсов положительной полярности длительностью более 0,1 *мксек*.

На рис. 34—36 приведены три различных схемных решения гармонического генератора на туннельном диоде.

Изображенный на рис. 34 ЧМ передатчик с штыревой антенной очень прост и позволяет вести надежный прием в радиусе 10—30 *м* на ЧМ приемник средней чувствительности. Ввиду того что схема модуляции передатчика простейшая, выходной сигнал несколько искажен и, кроме частотной модуляции, получается еще и амплитудная.

Это позволяет вести прием и на АМ приемник, но ограничивает радиус действия. Такой передатчик можно

использовать как переносный радиомикрофон, вызывное или переговорное устройство для малых расстояний.

Принцип действия гетеродина (рис. 35) такой же, как и предыдущей схемы. Отличительная особенность ее заключается в неполном включении контура. Это сдела-

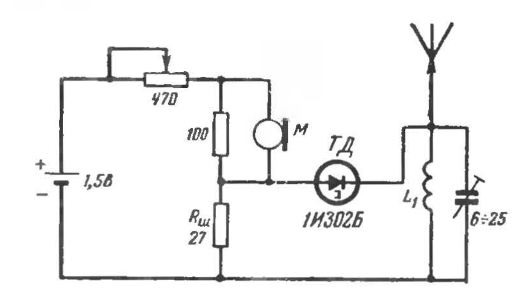


Рис. 34. Простейший передатчик на туннельном диоде (L_1 — 10 витков, диаметр намотки 7 *мм*).

но для улучшения формы и стабильности генерируемых колебаний. При таком включении эквивалентное сопротивление контура трансформируется в p раз, а степень нелинейных искажений генератора, состоящего из тун-

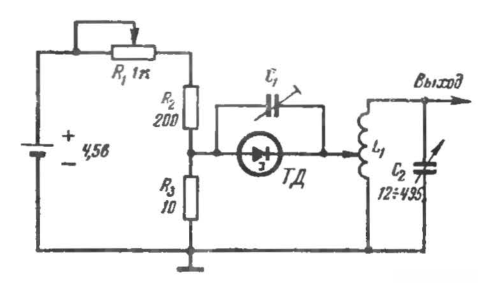


Рис. 35. Гетеродин на туннельном диоде (L_1 — 200 *мкгн*, коэффициент включения контура 1/6).

нельного диода и параллельного LC контура, тем меньше, чем ближе неравенство $R_{\text{ое}} \geqslant (-R_{\text{д}})$ к равенству. «Идеальная» синусоида может быть получена при $p^2 R_{\text{ое}} = |-R_{\text{д}}|$, но на практике небольшие нелинейные искажения неизбежны.

Изображенная на рис. 36 схема камертонного генератора звуковой частоты может использоваться как калибратор для настройки музыкальных инструментов.

Генератор может работать и на диодах с меньшими токами максимума. В этом случае должно быть увеличено число витков в катушках, а динамический громкоговоритель — включен через усилитель. Для нормальной работы генератора полное активное сопротивление $(R_1 + r_{\text{катушки}})$ должно быть меньше $|-R_{\text{д}}|$, а положение

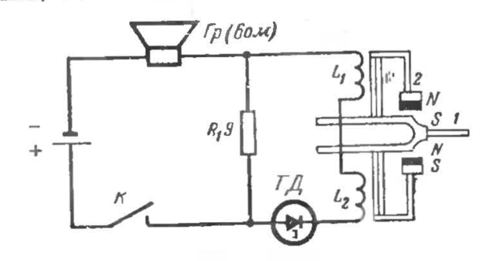


Рис. 36. Камертонный генератор.

1 — камертон на 440 *гц*; *2* — магнитный сердечник; *ТД* — туннельный диод с $I_{\text{макс}} \approx 70$ *ма*.

ножек камертона относительно магнитного сердечника — тщательно юстировано. Индуктивности катушек L_1 и L_2 по 196 *мкгн* (без сердечника).

Мультивибратор

Для работы с туннельными диодами часто бывает необходим генератор, имеющий относительно высокую частоту и малое время нарастания выходного импульса. Такую схему можно также построить, применяя туннельные диоды (рис. 37). Частота мультивибратора регулируется путем изменения индуктивности катушки L_1. Потенциометр R_1 служит для выбора режима питания диодов. Такой мультивибратор устойчиво работает на частотах от 90 до 5 000 *кгц* при изменении индуктивности от 100 до 1 *мкгн* соответственно. Время нарастания переднего фронта положительного перепада напряжения не превышает 10—15 *нсек*. Мультивибратор не требует регулировки и работает сразу после включения питания.

При включении питающего напряжения ток в диодах мультивибратора может распределиться так, что в диоде

$ТД_1$ ток будет стремиться к максимальному ($I_{макс}$), тогда в диоде $ТД_2$ ток будет близок к минимальному ($I_{мин}$).

Разностный ток будет протекать через катушку L_1 и резистор R_4, сопротивление которого меньше отрицатель-

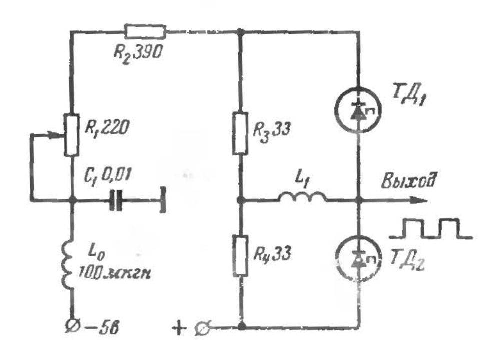


Рис. 37. Мультивибратор на частоту до 5 *Мгц*.

ного сопротивления диода. Поэтому диод $ТД_2$ неустойчив в состоянии 1 и переключится в состояние 0, так как рабочая точка диода $ТД_2$, опускаясь по диодной характеристике, попадет в нижнюю область отрицательного сопротивления диода.

Общий ток в цепи диодов задан больше $I_{макс}$, поэтому состояние 0 для диода $ТД_1$ будет неустойчивым и он переключится в состояние 1, как только ток через него превысит величину $I_{макс}$. В результате произойдет переключение диода $ТД_1$ из состояния 0 в состояние 1 и диода $ТД_2$ из состояния 1 в состояние 0. При этом переключение одного диода ускоряет переключение другого, так как изменение сопротивлений диодов при переключении вызывает перераспределение тока в индуктивности, а возникающая при этом э. д. с. облегчает переключение другого диода.

Если при включении питающего напряжения диоды установятся оба в состояние 0 или 1, то какой-нибудь из двух диодов переключится раньше другого в противоположное состояние, так как параметры схемы не полностью симметричны. Далее процесс переключения пойдет по тому же пути.

По аналогичной схеме был собран мультивибратор на туннельных диодах из арсенида галлия. Он имел амплитуду выходного сигнала до 1 *в*, а время нарастания фронтов импульсов не более 5—10 *нсек*. При этом мультивибратор мог устойчиво работать с индуктивностью меньшей 1 *мкгн* и до частот 10 *Мгц*.

Туннельные диоды из арсенида галлия имели характеристики: $I_{макс}=5$ *ма*; $U_{(макс)}=120$ *мв*; $I_{мин}=0{,}5$ *ма*; $U_{(мин)}=550$ *мв*; $U_н=1$ *в*; $C_д=5—10$ *пф*.

Пример расчета мультивибратора. Мультивибратор собран на туннельных диодах с $I_{макс}=5$ *ма*; $U_{(макс)}=50$ *мв*; $I_{мин}=1$ *ма*; $U_{(мин)}=250$ *мв*; $U_н=400$ *мв*; $C_д=200$ *пф*.

1. Находим сопротивление смещения R_0, исходя из среднего отрицательного сопротивления диода $R_0=1{,}3\cdot(-50)=35$ *ом*, берем $R_0=R_3=R_4=33$ *ом*.

2. Находим общий ток смещения $I_{см}$, проходящий через мультивибратор, для этого вычисляем r_1, r_2 и $R_{экв}$ [см. формулы (43—45)]:

$$r_1=\frac{50}{5}=10\ ом;\quad r_2=\frac{250}{1}=250\ ом;$$

$$R_{экв}=\frac{10\cdot 33}{33+10}+\frac{250\cdot 33}{250+33}=37\ ом;$$

$$I_{см}=\frac{50+250}{37}=8{,}2\ ма.$$

Учитывая коэффициент перевозбуждения $K_п=1{,}5$; $I_{общ}=1{,}5\cdot 8{,}2=12{,}3$ *ма*.

3. При э. д. с. источника питания 5 *в* гасящее сопротивление $R_б$ равно:

$$R_2+R_1=R_б\approx\frac{5-0{,}35}{12{,}3}=400\ ом.$$

4. Найдем время переключения диода $ТД_2$ из состояния 0 в состояние 1, учитывая, что через диод в состоянии 0 проходит 0,75 $I_{общ}$ (4 *в*):

$$t_{пер}=\frac{400-50}{9-1}\cdot 210\cdot 10^{-3}\approx 9\ нсек.$$

5. Минимальную индуктивность катушки, при которой может работать мультивибратор, определяем из условия $L_1\geqslant R_0 t_{пер}$

$L_1=33\cdot 9\cdot 10^{-3}=0{,}3$ *мкгн*, берем $L_1=1$ *мкгн*.

6. Вычисляем длительность импульса по формуле (50):

$$t_{в} = \frac{10^3}{33+10} \ln \left[\frac{9}{9-(9-1)} \right] = 51 \text{ нсек.}$$

7. Находим время спада импульса на выходе схемы при переключении $ТД_2$ из состояния 1 в состояние 0 из уравнения (49):

$$t_{пер} = 2{,}3 \cdot |-50| \cdot 210 \cdot 10^{-3} = 24 \text{ нсек.}$$

8. Время восстановления мультивибратора после переключения в состояние 0 вычисляем по формуле (51):

$$t'_{восст} = \frac{1 \cdot 10^3}{33+10} \ln \frac{2(9-1)}{1} \approx 93 \text{ нсек.}$$

9. Максимальная частота мультивибратора при $L_1 = 1$ *мкгн* с учетом симметричности схемы будет равна:

$$f_{макс} = \frac{10^3}{2(93+24)} \approx 4{,}3 \text{ Мгц.}$$

Повысить частоту мультивибратора можно, выбрав меньший коэффициент перевозбуждения схемы, так как это уменьшит время восстановления схемы, которое в основном определяет частоту ее переключения. Однако такая схема может работать неустойчиво.

Схема счетчика на германиевых туннельных диодах

На рис. 38 приведена схема счетчика на 5 *Мгц*. На входе счетчика имеется одновибратор с запуском от транзистора T_1. Транзистор пропускает только положительные сигналы, запускающие одновибратор, включенный в коллектор транзистора.

Счетчик, собранный авторами, запускался от мультивибратора на двух туннельных диодах. Все схемы были собраны на германиевых туннельных диодах. Выходная амплитуда со схемы триггера 350—400 *мв*, со схемы одновибратора 400 *мв*. Триггеры счетчика работают устойчиво при отклонении питающих напряжений и номиналов деталей ±2%.

Если подать на диоды смещение от источника тока с большим внутренним сопротивлением (например, коллекторного тока транзистора, включенного по схеме с общей базой), схема триггера работает даже при изменении питающего напряжения более ±20%.

Индуктивность L_3, включенная последовательно с балластным резистором, увеличивает входное сопротивление

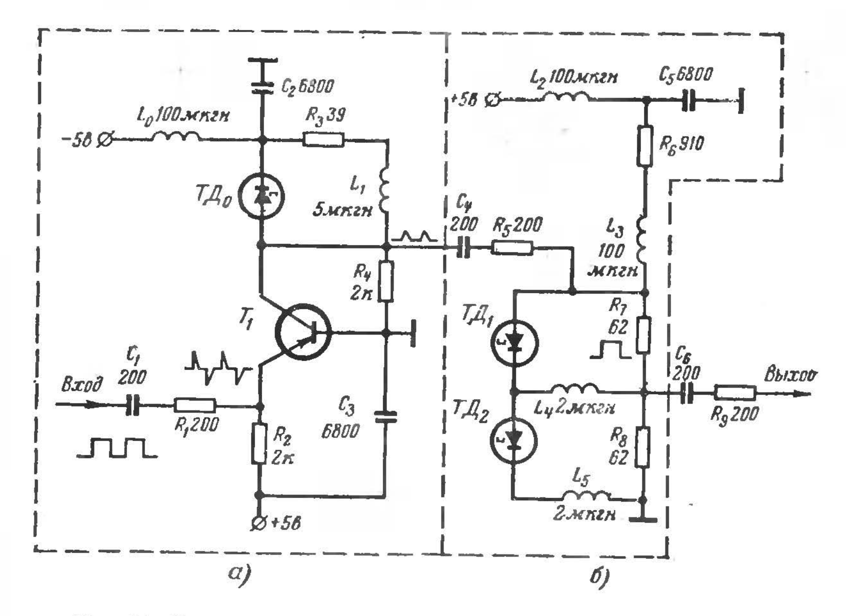


Рис. 38. Один разряд счетчика на рабочую частоту до 5 *Мгц*.
а — одновибратор с запуском от транзистора; *б* — триггер на двух туннельных диодах.

триггера для переменного сигнала. Индуктивность L_5 увеличивает нагрузочную способность триггера, способствует более устойчивому переключению диода $ТД_2$ из состояния 1 в состояние 0. Достоинство этой схемы — простота монтажа и отладки, недостаток — повышенные требования к источнику питания и радиодеталям.

Пример расчета триггера. Триггер (рис. 38,*б*) собран на туннельных диодах. Выбираем режим питания триггера со смещением по току ($R_6 = 1$ *к*).

1. Находим сопротивление резистора: $R(R_7, R_8) = 1{,}3(-r_{д}) = 1{,}3 \cdot 50 = 65$ *ом*, берем $R = 68$.

2. Находим питающее напряжение из уравнения (42) с учетом коэффициента смещения $K_{см}=0{,}8$:

$$E \approx 0{,}8\left(5+\frac{50}{68}\right)1\,000+50+250=5\ \textit{в}.$$

3. Определим пределы изменения питающего напряжения по неравенству (41), для этого вычислим r_1, r_2, $R_{экв}$ и $R'_{экв}$:

$$r_1=\frac{50}{5}=10\ \textit{ом};\quad r_2=\frac{250}{1}=250\ \textit{ом};$$

$$R_{экв}=\frac{10\cdot 68}{10+68}+\frac{250\cdot 68}{250+68}=62\ \textit{ома};$$

$$R'_{экв}=2\left(\frac{250\cdot 68}{68+250}\right)=107\ \textit{ом};$$

в неравенстве (41) вместо $U_{(макс)}$ берем $U_{см}$ для расширения пределов питающего напряжения:

$$\frac{62+1\,000}{62}(40+250)\leqslant E<\frac{2\cdot 250\,(107+1\,000)}{107}=$$
$$=4{,}9\ \textit{в}\leqslant E<5{,}2\ \textit{в}.$$

Как видно из расчета, при смещении по току пределы изменения питающего напряжения в процентном отношении невелики, но если увеличить $R_б$ до ∞, то пределы останутся такими же, как при питании от источника напряжения.

4. Вычислим время задержки выходного импульса относительно входного при импульсе тока запуска $I_{имп}=1{,}5$ *ма*, когда диод $ТД_1$ переключается из состояния 0 в состояние 1 (47)

$$t_{зад}=10\cdot 210\ln\left(\frac{5{,}5\cdot 10}{5{,}5\cdot 10-50}\right)10^{-3}=5\ \textit{нсек}.$$

5. Время нарастания переднего фронта выходного импульса при переключении диода $ТД_2$ из состояния 0 в состояние 1 вычислим по формуле (48):

$$t_{пер}=\frac{400-50}{5{,}5-1}\cdot 210\cdot 10^{-3}\approx 16\ \textit{нсек}.$$

6. Находим минимальную величину индуктивности, исходя из условия

$$L\geqslant 68\cdot 16\cdot 10^{-3}=1{,}2\ \textit{мкгн},\ \text{берем}\ 2\ \textit{мкгн}.$$

7. Время восстановления триггера при переключении диода $ТД_2$ в состояние 1 с учетом дополнительной индуктивности катушки L_5 будет:

$$t_{восст}=\frac{(2+2)\cdot 10^3}{68+10}\ln\left(\frac{5{,}5}{5{,}5-(5{,}5-1)}\right)=88\ \textit{нсек}.$$

8. Время задержки выходного импульса с триггера относительно входного при переключении диода $ТД_2$ из состояния 1 в состояние 0 находим по формуле:

$$t_{зад}=250\cdot 210\ln\left(\frac{1{,}5\cdot 250}{1{,}5\cdot 250-250}\right)10^{-3}=57\ \textit{нсек}.$$

9. Время переключения триггера из состояния 1 в состояние 0 определим по формуле (49):

$$t'_{пер}=2{,}3\cdot 50\cdot 210\cdot 10^{-3}=24\ \textit{нсек}.$$

10. Время восстановления триггера при переключении в состояние 0 находим из выражения (51)

$$t'_{восст}=\frac{(2+2)\,10^3}{68+10}\ln\left[\frac{2\,(4-1)}{1{,}5-1}\right]\approx 130\ \textit{нсек}.$$

11. Максимальная частота переключения триггера может быть вычислена по формуле (52)

$$f_{макс}=\frac{10^3}{57+24+130}=4{,}7\ \textit{Мгц}.$$

Счетчик на диодах из арсенида галлия

На рис. 39 изображена схема счетчика на туннельных диодах из арсенида галлия. Между разрядами триггеров включают одновибраторы, усиливающие и формирующие сигналы только положительной полярности. Сигналы отрицательной полярности не запускают одновибратор.

Смещение триггеров счетчика осуществляется при помощи нелинейных делителей, образованных резисторами R_4, R_{11} и диодами $Д_1$ и $Д_2$.

При таком способе смещения резко снижается критичность схемы к разбросу параметров радиодеталей и нестабильности питающего напряжения. Счетчик устойчиво работает при частоте входных импульсов до 10 *Мгц* при отклонении напряжения питания на $\pm 10\%$, а сопротивлений резисторов на $\pm 5\%$ от номинального значения.

Схема рассчитана на использование туннельных диодов из арсенида галлия 3И301. Диоды цепи смещения $Д_1$ и $Д_2$ должны иметь малое динамическое сопротивление, а падение напряжения на них в широком диапазоне изменения токов должно быть больше $2U_{(макс)} \approx 360$ *мв*, но меньше $2\,U_{(мин)} \approx 0{,}9$ *в*. Поэтому здесь удобно использовать стабилитроны Д808—Д813.

Пример расчета одновибратора на туннельном диоде. Одновибратор собран по схеме на рис. 39, смещение на диод подается через автономный делитель от высоковольтного источника ($E = +5в$). Одновибратор собран на диоде, имеющем характеристики: $I_{макс} = 5$ *ма*; $U_{(макс)} = 50$ *мв*; $I_{мин} = 1$ *ма*; $U_{(мин)} = 250$ *мв*; $U_н = 400$ *мв*; $C_д = 200$ *пф*.

1. Исходя из характеристики туннельного диода, которая для приближенных расчетов графически аппроксимируется прямыми линиями, находим сопротивление резистора по формуле (43):

$$r_1 = \frac{50}{5} = 10 \text{ ом}.$$

2. Задаемся током и напряжением смещения диода для состояния 0. Учитывая температурные влияния на характеристику диода, берем 20% от максимального тока и напряжения, а ток запуска $I_{имп} = 1{,}5$ *ма*:

$$I_{см} = 4{,}0 \text{ ма}; \quad U_{см} = 40 \text{ мв}.$$

3. Находим сопротивление резистора смещения, исходя из среднего отрицательного сопротивления диода. Берем R_0 на 30% меньше, чем $(-r_{д.ср})$:

$$|-r_{д.ср}| = \frac{U_{(мин)} - U_{(макс)}}{I_{макс} - I_{мин}} = \frac{250 - 50}{5 - 1} = 50 \text{ ом}. \qquad (56)$$

Выбираем $R_з = 33$ *ом*.

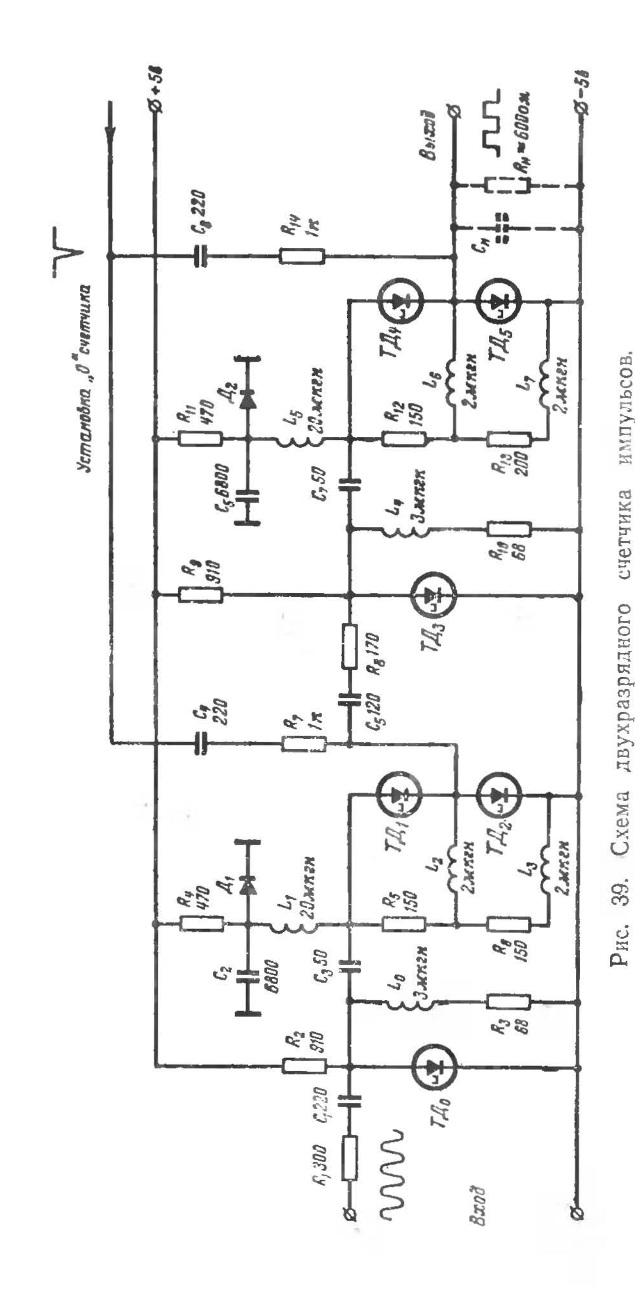


Рис. 39. Схема двухразрядного счетчика импульсов.

4. Находим общий ток смещения для одновибратора

$$I_{\text{см}} = \frac{U_{\text{см}}}{\dfrac{r_1 R_0}{r_1 + R_0}} = \frac{40}{\dfrac{10\cdot 33}{10+33}} = 5{,}2\ \textit{ма}. \qquad (57)$$

5. Требуемое значение индуктивности катушки L_0 при заданной длительности выходного импульса $t = 0{,}1$ *мксек* может быть вычислено по уравнению (50) для восстановления схемы при переключении диода из низковольтного в высоковольтное состояние:

$$L_0 = \frac{0{,}1\,(33+10)}{\ln\dfrac{5{,}5}{5{,}5-(5-1)}} \approx 3{,}3\ \textit{мкгн}.$$

6. Найдем время нарастания переднего фронта выходного импульса от уровня 10—90% по приближенной формуле (48):

$$t_{\text{нр}} = \frac{400-50}{5{,}5-1}\, 210\cdot 10^{-3} = 16\ \textit{нсек}.$$

7. Определим суммарную задержку выходного импульса относительно входного (без учета переднего фронта запускающего сигнала) из выражения (47):

$$t_{\text{зад}} = 10\cdot 210 \ln\left(\frac{5{,}5\cdot 10}{5{,}5\cdot 10-50}\right) 10^{-3} = 5\ \textit{нсек}.$$

8. Определим время спада выходного импульса при переключении диода из состояния 1 в состояние 0 (49):

$$t'_{\text{пер}} = 2{,}3\,|-50|\cdot 210\cdot 10^{-3} = 24\ \textit{нсек}.$$

9. Находим время восстановления одновибратора в исходное состояние после переключения в состояние 0:

$$t'_{\text{восст}} = \frac{3\cdot 3\cdot 10^3}{33+10} \ln\left[\frac{4+\dfrac{40}{33+10}}{1}\right] \approx 123\ \textit{нсек}.$$

10. Вычислим максимальную частоту работы одновибратора

$$f_{\text{макс}} = \frac{10^3}{100+5+16+24+123} \approx 4{,}5\ \textit{Мгц}.$$

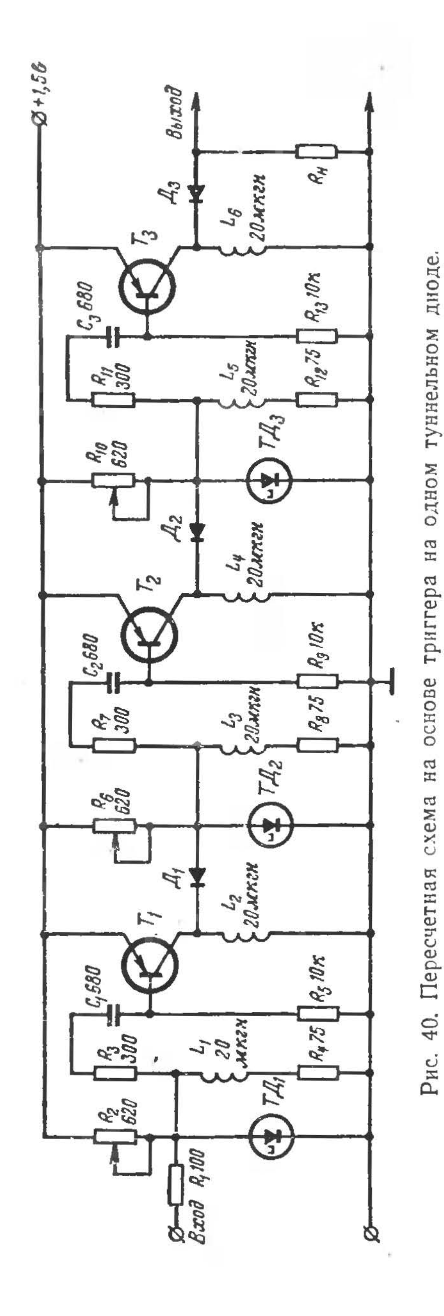


Рис. 40. Пересчетная схема на основе триггера на одном туннельном диоде.

Триггер на одном диоде

Простой триггер со счетным запуском можно выполнить, используя только один туннельний диод.

На рис. 40 показана пересчетная схема на 8, в которой работают такие триггеры. Принцип работы триггера заключается в следующем. Последовательно с диодом включен резистор нагрузки (R_4 для первого каскада), сопротивление которого больше среднего отрицательного сопротивления диода. При этом рабочая точка может находиться в двух устойчивых состояниях. В состоянии 0 напряжение на диоде меньше $U_{(\text{макс})}$, в состоянии 1 — больше $U_{(\text{мин})}$.

Запускающий импульс, поступающий на вход схемы, вызывает колебательный процесс в контуре, образованном сопротивлением нагрузки R_4 индуктивностью L_1 и туннельным диодом. Если рабочая точка находится в состоянии 0, то при увеличении тока через диод до $I_{\text{макс}}$ напряжение на диоде увеличивается скачком до величины, соответствующей состоянию 1.

Следующий импульс также вызывает затухающий колебательный процесс, при котором ток через диод попеременно увеличивается и уменьшается. Если ток уменьшается до $I_{\text{мин}}$, то напряжение на диоде скачком падает и рабочая точка вновь возвращается в состояние 0.

Триггер на одном диоде работает устойчиво лишь от импульсов со стабильной амплитудой и длительностью. Для схемы рис. 40, в которой использованы диоды 3И301, амплитуда запускающих импульсов должна быть в пределах 1—1,5 *в*, длительность — 0,1—0,3 *мксек*.

Для более устойчивой работы триггеры соединены между собой при помощи простых усилителей-формирователей на транзисторах П416 или П403 и разделительных диодах Д9. Режим работы туннельных диодов устанавливают потенциометрами R_2, R_6, R_{10}.

Описанная схема может работать от импульсов с частотой до 5 *Мгц*. Все катушки индуктивности в пределах 10—100 *мкгн* могут быть выполнены на любом стандартном сердечнике.

Преобразователь аналог — число

В автоматике, системах телеизмерений и др. часто используются устройства для преобразования сигналов с изменяющейся амплитудой в серию импульсов. Число

импульсов в серии определенным образом связано с амплитудой преобразуемого сигнала.

На туннельных диодах можно сделать очень простую схему такого преобразователя аналог — число. Соединим последовательно несколько туннельных диодов с близкими по величине токами максимума. Вольт-амперная характеристика такой цепочки диодов будет иметь вид,

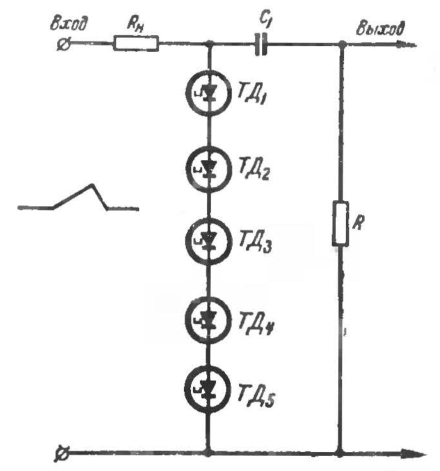


Рис. 41. Схема преобразователь аналог—число.

показанный на рис. 31. Число максимумов тока и участков с отрицательным сопротивлением на ней равно числу последовательно соединенных диодов.

Будем подавать на такую цепочку через резистор нагрузки $R_н$ импульсы входного напряжения, например, треугольной формы. Напряжение на диодах и на нагрузке будет скачком изменяться всякий раз, когда рабочая точка будет достигать одного из максимумов характеристики. Перепады напряжения на диодах диффеpенцируются с помощью цепочки *RC* и преобразуются в остроконечные импульсы с постоянной амплитудой и формой. При нарастании входного сигнала на выходе цепочки (рис. 41) появляются импульсы одной полярности, при спаде — противоположной; они соответствуют перепадам напряжения на диодах, когда рабочая точка достигает минимумов характеристики.

Первый перепад напряжения произойдет при достижении входным сигналом величины $U_{вх1}$:

$$U_{вх1}=NU_{(макс)}+R_{н}I_{макс}, \qquad (58)$$

где N — число последовательно включенных диодов.

Таким образом, сигналу с амплитудой $U_{вх1}$ соответствует серия из одного импульса напряжения выбранной полярности с выхода преобразователя.

Пачка из n импульсов соответствует сигналу с амплитудой $U_{вхn}$. При этом

$$U_{вхn}=NU_{(макс)}+R_{н}I_{макс}+(n-1)\Delta U, \qquad (59)$$

где ΔU — максимальное напряжение переключения одного диода.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

Генератор регулируемого постоянного тока (ГПТ) с внутренним сопротивлением не менее $20U_{н}/I_{макс}$ присоединяют через измеритель тока (ИТ) к испытуемому диоду (рис. 42). Падение напряжения на диоде измеряется прибором (ИН) с внутренним сопротивлением не менее $50U_{н}/I_{макс}$ ($U_{н}$ — наибольшее напряжение на диоде).

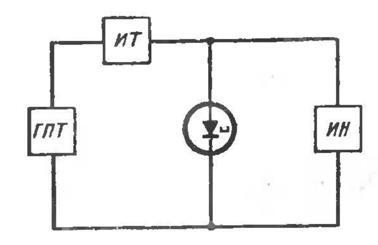


Рис. 42. Снятие вольт-амперных характеристик туннельных диодов.

ГПТ — генератор постоянного тока; *ИТ* — измеритель тока; *ИН* — измеритель напряжения.

Ток через диод медленно увеличивают до тех пор, пока напряжение на нем не изменится скачком от $U_{макс}$ до $U_{н}$. Регистрируемый прибором (ИТ) ток в момент скачка равен $I_{макс}$. В момент обратного скачка напряжения от $U_{мин}$ при уменьшении тока регистрируется величина $I_{мин}$.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОЙ ЕМКОСТИ ДИОДА

При измерении постоянное напряжение на диоде от генератора регулируемого напряжения (ГН) устанавливают близким к $U_{(мин)}$ (рис. 43).

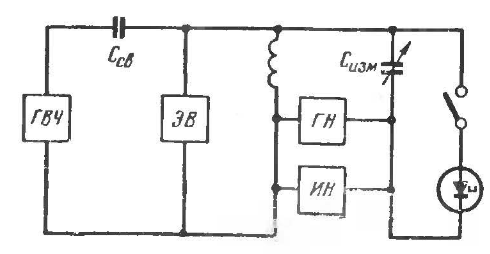


Рис. 43. Схема измерения емкости туннельных диодов.

ГВЧ — генератор высокой частоты; *ГН* — генератор постоянного напряжения; *ИН* — измеритель напряжения; *ЭВ* — электронный вольтметр.

Контур из $LC_{изм}$ настраивают в резонанс при максимально большой емкости $C_{изм}$ (соответствующий отсчет будет C_1).

При подключении диода контур вновь настраивается в резонанс (отсчет C_2).

Емкость диода $C_д$ равна:

$$C_д = C_1 - C_2.$$

Частоту для измерений следует выбирать в пределах 10—25 *Мгц*. Амплитуда высокочастотного напряжения на диоде и контуре должна быть не более нескольких милливольт.

3. ДИОДЫ ТУННЕЛЬНЫЕ АРСЕНИД-ГАЛЛИЕВЫЕ 3И301А, 3И301Б, 3И301В, 3И301Г

Предназначены для работы в радиоэлектронной аппаратуре в качестве переключающих элементов (рис. 44, 45).

Диоды оформлены в металлокерамическом корпусе с гибкими выводами.

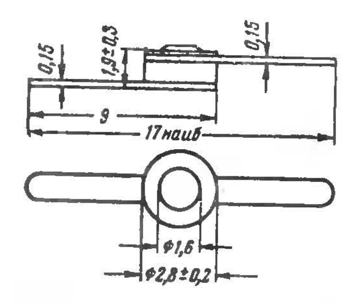


Рис. 44. Габаритный чертеж диодов 1И302А—1И302Г.

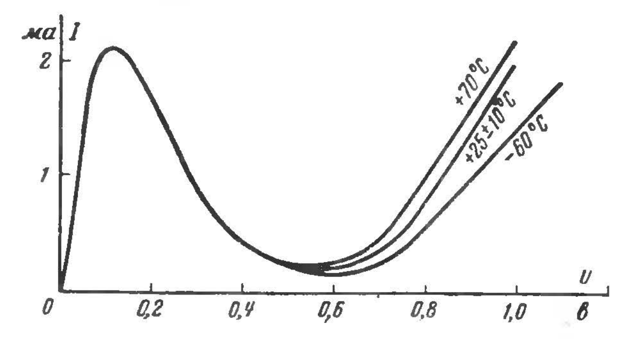


Рис. 45. Вольт-амперная характеристика диода 3И301А.

Вес диода не более 0,07 *г*.

Типы диодов	Параметры							
	$I_{макс}$, *ма*	Допустимое отклонение ΔI, *ма*	$H = \frac{I_{макс}}{I_{мин}}$ не менее	$U_{(макс)}$ не более, *мв*	$U_н$, *мв*	$C_д$ не более, *пф*	$I_{макс}$ при t +70° С *ма*	$I_{макс}$ при t −60° С, *ма*
3И301А	2	±0,4	8	180	650	12	1,5—2,4	1,4—2,7
3И301Б	5	±0,5	8	180	850—1 150	25	4,2—5,5	3,9—6,2
3И301В	5	±0,5	8	180	1 000—1 300	25	4,2—5,5	3,9—6,2
3И301Г	10	±1	8	180	800	50	8,4—11	8—12

Предельные эксплуатационные данные

Интервал рабочих температур от —60 до +70° С.

Относительная влажность при температуре +40° С до 98%.

Атмосферное давление от 5 *мм рт. ст.* до 3 *ат*.

Постоянные ускорения до 150 *g*.

Ударные ускорения до 120 *g*.

Вибрация с двойной амплитудой, создающей ускорение до 10 *g* (но не превышающей 2 *мм*), в диапазоне частот от 20 до 1 000 *гц*.

Срок службы не менее 5 000 *ч*.

Указания по эксплуатации

При эксплуатации рекомендуется ток во второй восходящей ветви снижать до возможно меньших значений. Диоды припаиваются к элементам схем в течение не более 3 *сек* на расстоянии не менее 3 *мм* от корпуса с обязательным теплоотводом между местом пайки и корпусом диода. Температура паяльника при этом не должна превышать +250° С. При изгибе вывода необходима жесткая фиксация его основания.